



Vasco André Sobral

**Decisão conceptual no projecto de
estruturas metálicas do tipo galeria -
análise mecânica e económica de
soluções treliçadas e tubulares**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António Gabriel Duarte dos
Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Freire Mourão

Vogais: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso

Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Setembro 2013]

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

**Decisão conceptual no projecto de estruturas
metálicas do tipo galeria - análise mecânica e
económica de soluções treliçadas e tubulares**

Por:

Vasco André Sobral

Orientador:

Professor Doutor António Gabriel Duarte dos Santos

Lisboa

2013

Decisão conceptual no projecto de estruturas metálicas do tipo galeria - análise
mecânica e económica de soluções treliçadas e tubulares

Copyright @ Vasco André Sobral, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço o apoio incondicional e indispensável da minha família durante todo o tempo que necessitei para chegar até este ponto da minha vida.

Relativamente às necessidades encontradas para o desenvolvimento da presente dissertação agradeço aos professores João Cardoso e Pedro Coelho pela ajuda fornecida para solucionar alguns problemas que surgiram durante a fase de construção dos modelos em causa no estudo e nas restantes necessidades ao longo de todo o trabalho não poderei esquecer as indicações e conselhos práticos transmitidos pelos professores António Gabriel e António Mourão.

Resumo

Actualmente existe uma necessidade de obter uma noção do custo de projectos industriais, para conseguir uma melhor avaliação dos projectos numa fase inicial de concepção dos mesmos e poder decidir entre várias soluções alternativas. No presente estudo foram considerados dois tipos de estruturas metálicas, do tipo galeria aérea, utilizadas para transporte de produtos a granel por meio de transportadores de correia, tendo sido consideradas estruturas tubulares e estruturas em treliça. Foram ainda estudadas duas larguras de estruturas diferentes, para avaliação dos custos de cada tipo de estrutura em função das suas larguras. A análise dos custos parciais inerentes à construção de cada um dos tipos de estruturas permitiu ter uma noção dos impactos de cada uma das parcelas no custo final de cada estrutura e verificar que as estruturas treliçadas são mais favoráveis sob o ponto de vista do custo inicial.

Palavras-chave: Tomada de decisão, projecto mecânico, estruturas metálicas, estimação de custo, desenvolvimento do produto

Abstract

Currently there is a need to gain an understanding of the cost of industrial projects to achieve a better evaluation of projects at an early stage of their design and to decide between multiple solutions alternatives. The present study considered two types of steel structures; the aerial gallery type used for conveying bulk goods by means of belt conveyors, and were considered tubular structures and lattice structures. We also studied two different widths structures for assessment of the costs of each type of structure in terms of their widths. Analysis of partial costs inherent to the construction of each type of structure enabled to get a sense of the impact of each of the parcel of total cost of the structure and found that the lattice structures are most favorable from the point of view of initial cost.

Keywords: Decision making, mechanical design, steel structures, cost estimation, product development

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	v
1 Introdução.....	1
2 Objectivos	5
3 Caso de estudo	7
3.1 Dimensionamento das estruturas.....	7
3.2 Estruturas treliçadas	7
3.2.1 Tipos de treliças	9
3.2.2 Junção de módulos	10
3.2.3 Revestimento exterior	10
3.3 Estruturas tubulares.....	11
3.3.1 Junção de módulos	13
3.4 Tapetes transportadores.....	14
3.4.1 Material transportado	15
3.4.2 Correia do tapete transportador	15
3.4.3 Estações de ida e retorno	16
3.4.4 Rolos	18
3.4.5 Estrutura de suporte do tapete transportador	19
3.5 Cargas adicionais.....	19
3.6 Simplificações assumidas.....	20
4 Construção dos modelos em ANSYS.....	21
4.1 Criação dos Modelos.....	21
4.2 Escolha dos Elementos.....	23
4.3 Secção Treliçada	25
4.4 Secção Tubular.....	29
4.5 Zonas de reforço.....	36
4.6 Restrições nos apoios	37
4.7 Refinação da malha	40

4.8	Aplicação de cargas.....	41
4.8.1	Cargas distribuídas	41
4.8.2	Acção do Vento.....	44
4.8.3	Códigos da aplicação das cargas	49
5	Optimização de estruturas	53
5.1	Optimização de estrutura com Algoritmos Genéticos – Estrutura treliçada	53
5.1.1	Análise através do GATool	53
5.1.2	Adaptação do Algoritmo ao problema	55
5.1.3	Dados de entrada para a estrutura treliçada.....	57
5.2	Optimização da estrutura tubular	58
5.2.1	Dados de entrada para a estrutura tubular	58
5.3	Constrangimentos da avaliação	59
5.3.1	Constrangimentos dimensionais.....	59
5.3.2	Constrangimentos dos materiais.....	61
6	Custos	63
6.1	Custos secção Treliçada	64
6.2	Custos secção Tubular.....	70
7	Análise de Resultados	77
7.1	Estrutura Treliçada	77
7.1.1	Análise Estrutural	77
7.1.2	Análise de Custos	80
7.2	Estrutura Tubular.....	82
7.2.1	Análise Estrutural	82
7.2.2	Análise de Custos	84
8	Conclusões	87
9	Trabalhos futuros	89
10	Referências Bibliográficas	91
ANEXOS	93

Índice de Figuras

Fig. 1.1- Estrutura treliçada.....	1
Fig. 1.2- Estrutura tubular	2
Fig. 1.3- Fluxograma do estudo pretendido.	4
Fig. 3.1- Estrutura Treliçada	8
Fig. 3.2- Corte de secção de uma estrutura treliçada.....	8
Fig. 3.3- Exemplo de espaço de circulação no interior de uma estrutura treliçada	9
Fig. 3.4- Exemplo de treliças formadas por diferentes perfis	9
Fig. 3.5 – Ligações aparafusadas de módulos das estruturas	10
Fig. 3.6- Exemplos de chapas caneladas lacadas a) e zincadas b) [9].....	11
Fig. 3.7- Estrutura Tubular.....	12
Fig. 3.8- Corte de secção de uma estrutura tubular	13
Fig. 3.9-Junção de módulos em estruturas tubulares.....	13
Fig. 3.10-Esquema do tapete transportador.....	14
Fig. 3.11-Carvão Mineral	15
Fig. 3.12-Ângulo de repouso.....	15
Fig. 3.13-Estações de ida.....	16
Fig. 3.14- Ângulos de inclinação (λ) dos rolos e de sobrecarga (β).	17
Fig. 3.15-Estações de retorno	17
Fig. 4.1-Modelo de construção da estrutura treliçada.	22
Fig. 4.2-Secção frontal do modelo de construção da estrutura tubular (mm).	22
Fig. 4.3-Secção lateral do modelo de construção da estrutura tubular.	23
Fig. 4.4-Geometria do elemento BEAM188 [13].....	23
Fig. 4.5-Geometria do elemento SHELL181 [13].....	24
Fig. 4.6-Geometria do elemento LINK180 [13].....	24
Fig. 4.7-Anel primario (rectangular) da construção da secção treliçada	25
Fig. 4.8-Geração de aneis iguais ao inicial.....	26
Fig. 4.9-Código da geração das linhas longitudinais da estrutura.	26
Fig. 4.10-União dos aneis criados.	27
Fig. 4.11-Orientação das barras verticais da estrutura.	27
Fig. 4.12-Várias configurações de barras diagonais.....	28
Fig. 4.13-Estrutura construida em Ansys já concluida.....	29
Fig. 4.14-Dimensionamento da secção transversal da estrutura tubular.	30

Fig. 4.15-Regressão linear do diametro da circunferência em função da dimensão das estações.	31
Fig. 4.16-Evolução da construção de linhas orientadoras para a construção do circulo primario.	33
Fig. 4.17-Exemplo da geração dos aneis da estrutura tubular.	34
Fig. 4.18-Pontos de ligação da estrutura aos pés de apoio.	35
Fig. 4.19-Zona de reforço / apoio da estrutura.	36
Fig. 4.20-Anel de ligação de secções.	37
Fig. 4.21-Zona de transfega.	38
Fig. 4.22-Ligação da estrutura a um armazém.	38
Fig. 4.23- Apoios de suporte das estruturas a) treliçada e b) circular	39
Fig. 4.24-Zona de apoio de uma estrutura treliçada.	40
Fig. 4.25-Disposição de cargas nas barras inferiores.	42
Fig. 4.26-Disposição de cargas nas barras superiores.	43
Fig. 4.27-Velocidade média do vento em função da altura [11].	46
Fig. 4.28-Pressão dinâmica de pico [11].	47
Fig. 4.29-Exemplo da área afectada pela carga do vento em cada nó.	47
Fig. 4.30-Áreas definidas.	48
Fig. 4.31-Refinação automática das áreas geradas.	49
Fig. 4.32- Modelo de aplicação das cargas na estrutura treliçada.	50
Fig. 4.33- Modelo de aplicação das cargas na estrutura tubular.	50
Fig. 4.34-Código de aplicação das cargas na estrutura treliçada.	51
Fig. 4.35-Código de aplicação das cargas na estrutura tubular.	51
Fig. 4.36- Código de aplicação das cargas geradas pelo vento segundo as áreas consideradas (zona de reforço intermedia na estrutura considerada).	52
Fig. 5.1- Algoritmo genético simples [15].	54
Fig. 5.2- Aplicação dos operadores genéticos na AG simples [15].	55
Fig. 6.1-Tabela de custos para as chapas caneladas lacadas [20].	66
Fig. 7.1- Peso de cada parcela de custo para a estrutura treliçada, correia de 650mm.	81
Fig. 7.2- Peso de cada parcela de custo para a estrutura treliçada, correia de 1600mm.	81
Fig. 7.3-Tensões na estrutura tubular segundo o Eixo Z, com esp=5mm.	83
Fig. 7.4-Tensão na estrutura tubular segundo o Eixo Z, com esp=5mm.	84
Fig. 7.5- Peso de cada parcela de custo para a estrutura tubular, correia de 650 mm.	86
Fig. 7.6- Peso de cada parcela de custo para a estrutura tubular, correia de 1600 mm.	86

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Características das estações de ida e retorno.....	18
Tabela 3.2 - Passos entre cada estação.	18
Tabela 3.3- Dados referentes aos rolos utilizados	19
Tabela 3.4 - Cargas adicionais presentes nas estruturas.....	20
Tabela 4.1- tabela com o valor dos diâmetros do “tubo” da estrutura em função da largura das estações.	30
Tabela 4.2-Cargas nas duas correias consideradas.....	41
Tabela 4.3 – Cargas adicionais e extra tapete transportador.	41
Tabela 4.4 - Excertos da tabela 7.2 [12] sobre arrasto em corpos tridimensionais	45
Tabela 5.1- Tabela de conversão para código binário e referência a um tipo de barra tubular quadrada (exemplo).....	56
Tabela 5.2 -Valores recomendados para os limites dos deslocamentos verticais [6]:.....	60
Tabela 5.3 – Características do material escolhido para as estruturas.	61
Tabela 6.1-Custo do perfil quadrado por área de secção por metro.....	65
Tabela 6.2-Custo do perfil rectangular por área de secção por metro.....	66
Tabela 6.3-Tabela dos custos da estrutura treliçada.....	67
Tabela 6.4- Tabela de preços de chapa preta laminada a quente, qualidade RSt 37.2 [20]:	71
Tabela 6.5-Tabela de preços de vigas HEB, HEA e IPE [20].....	71
Tabela 6.6-Tabela dos custos envolvidas na estrutura tubular.	72
Tabela 7.1- Perfis e respectivas barras associadas utilizados na optimização com algoritmo genético.	78
Tabela 7.2- Resultados para a estrutura treliçada com uma correia de 650 mm.	79
Tabela 7.3- Resultados para a estrutura treliçada com uma correia de 1600 mm.	79
Tabela 7.4- Custos totais na estrutura treliçada.....	80
Tabela 7.5- Parcelas de custos envolvidos na construção da estrutura treliçada.....	80
Tabela 7.6 – Resultados da estrutura tubular em função da espessura admitida para uma correia de 650 mm com $dz=0,5$	82
Tabela 7.7 - Resultados da estrutura tubular em função da espessura admitida para uma correia de 1600 mm.	83
Tabela 7.8-Custos totais na estrutura tubular.	85
Tabela 7.9-Parcelas de custos envolvidos na construção da estrutura tubular.	85

Simbologia

A – número de secções entre apoios.

A_chapa_1 – área da chapa principal considerada para se formar a estrutura tubular

A_CHAPA_ANEIS – área da chapa considerada para se formarem os anéis de reforço da estrutura tubular

A_corte_i - área de corte representante da área total existente de corte na estrutura para o perfil i

A_corte_mat_i – área de corte do material i

A_corte_vigas_int – área de corte das vigas internas da estrutura tubular

A_pint_i – área de pintura de cada perfil i

A_pint_vigas_int – área de pintura das vigas internas da estrutura tubular

A_total_pintura – área total de pintura

Altura – diferença entre a cota a que encontra a viga superior e a inferior na estrutura treliçada

Area_seccao_i – Área de secção da viga pertencente ao perfil i

b – ângulo de inclinação dos pontos gerados para simular a posição dos pés de apoio.

C, NA – número de anéis de reforço.

C_chapas - Custo das chapas

C_chapas_laterais - custo das chapas laterais

C_chapas_sup - custo das chapas superiores e inferiores

C_cord_sold – custo de cada cordão de soldadura por comprimento

C_corte – custo de corte referência

C_corte_mat_i - custo de corte de cada perfil

C_mat_i – custo de cada tipo de perfil

C_mat_total – custo total do material na estrutura

C_pint_i – custo de pintura e decapagem por unidade de área

C_pint_total – custo total de pintura

C_pintura – custo referência de pintura

C_prep – custo referência de preparação

C_prep_mat – custo total de preparação

C_processo_calandragem – custo referencia para o custo da operação de calandragem

C_sold_mat_i - custo do cordão de soldadura de cada perfil i

C_total_pintura – custo total de pintura

C_total_prep – custo total de preparação

C_total_prep_i – custo total de preparação para cada tipo de material (1- chapas e 2- vigas internas)

C_vigas_int – custo das vigas internas na estrutura tubular

Caland_chapa_1 – custo de calandragem das chapas 1 na estrutura tubular

comp_apoio – dimensão de distancia do ponto de posição dos pés de apoio em relação á superfície da estrutura tubular.

Comp_barras_i – comprimento das barras i

Comp_total_vigas:int – comprimento total das vigas internas na estrutura tubular

Comp_vigas_int – comprimento de cada viga interna na estrutura tubular

Custo_mat_i – custo material para cada perfil

Custo_trel – custo total de fabrico da estrutura treliçada

Custo_tub – custo total da estrutura tubular

D_aco – densidade do aço

dim_esp_i – espessura da barra i

dim_x_i – dimensão x da barra i

dim_x_vigas – dimensão x das vigas internas na estrutura tubular

dim_y_i – dimensão y da barra i

dim_y_vigas - dimensão y das vigas internas na estrutura tubular

dist- comprimento das subsecções consideradas

dist_total- distância total considerada

dr – metade da dimensão do reforço (°).

dz- metade da distância de reforço da estrutura tubular.

esp_aneis – espessura dos anéis de reforço

F_ad – Força adicional considerada sobre as estruturas.

f_andamento – factor de andamento assumido para o processo de soldadura

F_c – Força gerada sobre a estrutura provocada pela existência de corrimão.

f_corte - factor de correcção associado ao custo do processo de corte.

F_g – Força gerada sobre a estrutura provocada pelas passadeiras/grades.

f_mat – factor de correcção associado ao custo do material a adquirir.

F_op - Força gerada sobre a estrutura provocada pela existência de operários e material para se efectuar uma reparação.

f_pint - factor de correcção associado ao custo da pintura.

f_prep - factor de correcção associado ao custo do processo de preparação do corte, soldadura e o armar das estruturas.

f_sold - factor de correcção associado ao custo processo de soldadura.

F_t - Força gerada sobre a estrutura provocada pelo tapete transportador em funcionamento.

F_v - Força gerada sobre a estrutura provocada pela acção do vento na estrutura.

F_A - Força resultante sobre as barras/vigas inferiores, lado direito.

F_B – Força resultante sobre as barras/vigas inferiores, lado Esquerdo.

F_C – Força resultante sobre as barras/vigas superiores, lado direito.
 F_D – Força resultante sobre as barras/vigas superiores, lado Esquerdo.
 H – Altura interior disponível para a livre circulação dos funcionários.
 H_1 – Espaço considerado para a circulação de um operário no interior da estrutura.
 K, M - metade do número de subsecções entre apoios para cada estrutura
 L , largura_estacoes - largura das estações escolhidas para as estruturas
Largura_aneis – largura dos anéis de reforço da estrutura
largura_inf - comprimento das barras inferiores e superiores da estrutura treliçada
 n - número total de subsecções
 n_{barras_i} – número de barras de cada perfil i
 $n_{barras_i_{maj}}$ – número de barras de 6m majorado
 $n_{chapa_calandrada}$ – numero de chapas calandradas
 N_{passos_sold} – número de passos de soldadura admitidos
 p - número de perfis considerados
 P_{mat_i} – perímetro exterior da secção do perfil i
 P_{sold_chapas} – perímetro de soldadura para as chapas na estrutura tubular
 P_{sold_vigas} – perímetro de soldadura das vigas internas na estrutura tubular
 $P_{total_mat_i}$ – perímetro exterior total em cada perfil i
 P_{total_sold} – perímetro total de soldadura
 Q_{ad} – Carga adicional considerada sobre as estruturas.
 Q_c – Carga gerada sobre a estrutura provocada pela existência de corrimão.
 Q_g – Carga gerada sobre a estrutura provocada pelas passarelas/grades.
 Q_{op} , Q_o - Carga gerada sobre a estrutura provocada pela existência de operários e material para se efectuar uma reparação.
 Q_t - Força gerada sobre a estrutura provocada pelo tapete transportador em funcionamento.
 Q_v - Força gerada sobre a estrutura provocada pela acção do vento na estrutura.
 R – Raio da circunferência da estrutura tubular.
 R_{mat_i} – relação de custo com o perfil a considerar
 T - número de apoios
 $T_{prep_corte_sold_mats}$ - tempo de preparação de soldadura e corte por cada barra
 $teta$ – posição do reforço em relação à circunferência da estrutura tubular ($^{\circ}$).
 w – parâmetro de correcção do número de anéis de reforço.
 y – altura do reforço.
 β - Ângulo de sobrecarga.
 λ - Ângulo de inclinação dos rolos.

1 Introdução

Actualmente é necessário saber usar e beneficiar ao máximo de todos os recursos de que disponibilizamos no nosso planeta. Com este olhar sobre o futuro surge a preocupação de reduzir ao máximo os recursos, materiais e energéticos, gastos com um projecto garantindo a sua normal funcionalidade.

No caso de estudo apresentado serão analisadas duas variantes de estruturas aéreas do tipo galeria. Uma vez que existem muitas conjugações de materiais a usar nestas, apenas serão estudadas as mais usadas nos dias de hoje.

Dentro das várias variantes existentes destacam-se as de secção treliçada (Fig. 1.1) e a de secção tubular (Fig. 1.2).



Fig. 1.1- Estrutura treliçada



Fig. 1.2- Estrutura tubular

Existem muitas utilizações possíveis para tais estruturas, mas usualmente encontram-se associadas à presença de um tapete rolante no seu interior para o transporte de produtos de um ponto A para um ponto B.

Com a necessidade de garantir a funcionalidade de um tapete rolante em pleno e da sua normal manutenção serão considerados vários factores determinantes para o efeito.

A grande diferença entre estas foca-se na sua construção, uma delas é constituída por elementos barra formados por perfis laminados e a outra por perfis laminados na sua minoria e por chapas dobradas (resultantes do processo de calandragem) e soldadas formando um “tubo gigante”, visto do ponto do seu comprimento.

Dentro dos estudos já efectuados são encontrados métodos de ligações de treliças, tipos de treliças a adoptar para algumas situações particulares, bem como os custos envolvidos para a construção de treliças específicas [1] e mais virados a estruturas metálicas em geral [2].

Uma constante evolução dos estudos passa pela utilização de algoritmos genéticos para suportar o elevado número de cálculos que seriam necessários para se conseguir resolver um problema de uma dada estrutura metálica composta por treliças ([3] [4]) e de forma se conseguir diminuir ao máximo o material a colocar na sua construção [5].

A escolha do número de módulos pode ser muito importante do ponto de vista do transporte, uma vez que também envolve custos e várias limitações dimensionais podendo ser necessário transpor outras estruturas já existentes e circular na via pública, mas esta preocupação não terá grande relevância para o estudo estrutural, sendo apenas considerado para

o custo das estruturas uma vez que estamos a considerar que o numero de módulos e pés de suporte serão o mesmo para ambos os casos.

Os custos considerados neste trabalho tiveram por base os valores obtidos juntos de empresas de metalomecânica, que actuam nas áreas relacionadas com os equipamentos analisados neste estudo.

Tendo os custos um peso aproximado do que se verifica na realidade, uma vez que este estudo visa dar uma noção inicial dos mesmos e não os resultados que seria de esperar para o custo final de uma estrutura destas dimensões. Os custos estarão separados por parcelas de custos para que seja mais fácil a percepção de onde se encontram verdadeiramente os que têm mais influencia para o resultado final de cada situação abordada.

É necessário ter em conta que os custos envolvido na construção de uma estrutura destas dimensões variam no tempo, de empresa para empresa e com a quantidade de material a considerar.

As estruturas consideradas neste estudo diferenciam-se pelos tipos construtivos respectivos. Para cada uma delas é necessário tomar decisões do ponto de vista construtivo, uma vez que, para serem verdadeiramente alternativas, têm de respeitar os mesmos requisitos funcionais. A Fig. 1.3 ilustra o desenvolvimento realizado. Numa primeira fase, foi feita a selecção das hipóteses para o tipo de estrutura; seguidamente, fez-se a modelação dos dois tipos comparados – treliçada e tubular -, seguida da avaliação funcional (mecânica), com optimização estrutural; posteriormente, com base na modelação, foi realizada a estimação de custos para os dois casos; e, por fim, apresentam-se as conclusões para que os decisores possam decidir racionalmente.

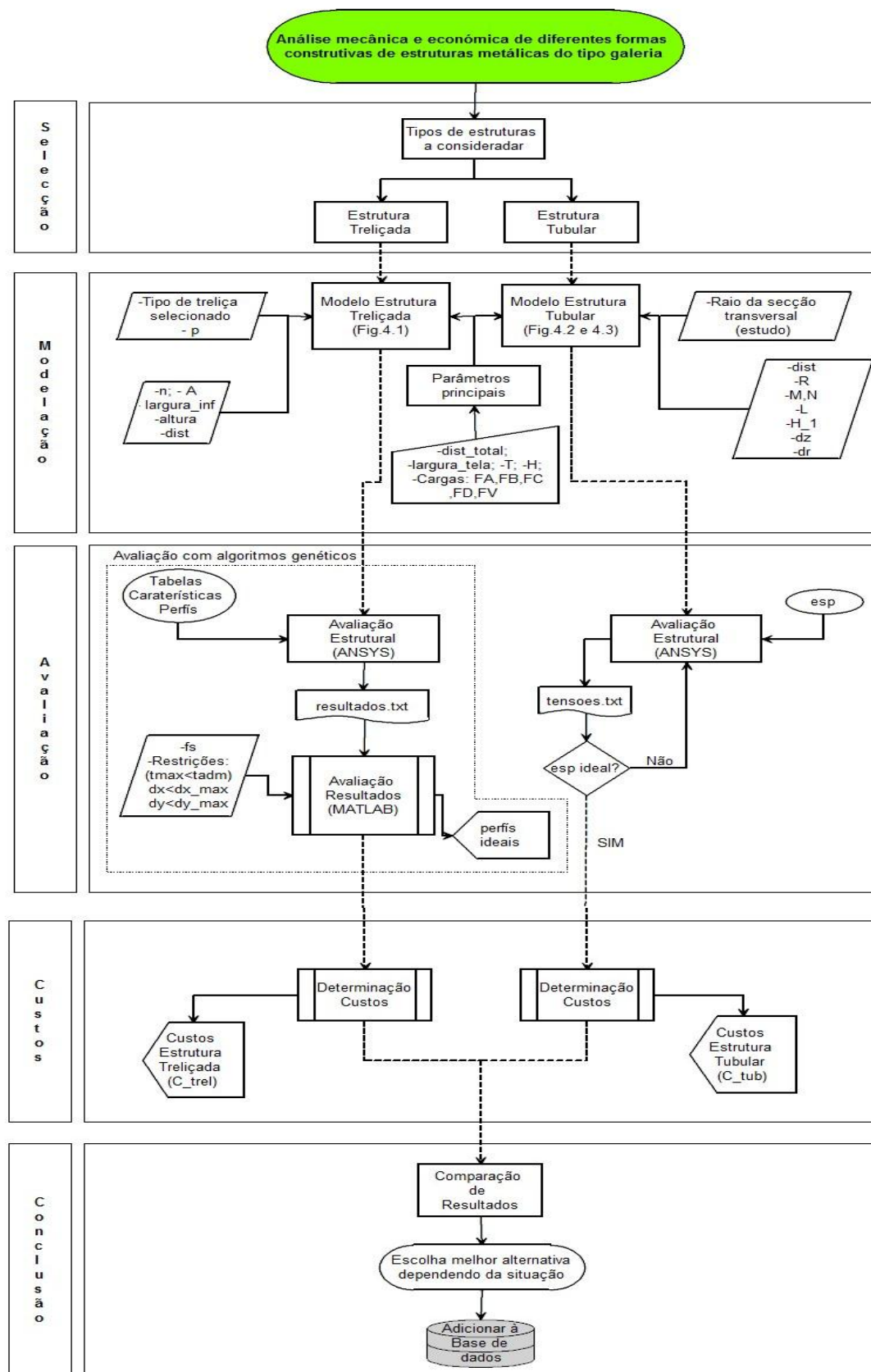


Fig. 1.3- Fluxograma do estudo pretendido.

2 Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo o contributo para um estudo que relacione as características encontradas em cada estrutura (estrutura treliçada e tubular) com os parâmetros desejados para uma situação de igual funcionalidade entre cada estrutura. A escolha destes parâmetros recai sobre a situação distinta de duas larguras de telas transportadoras consideradas para uma dada distância em que existem 4 apoios no seu todo e estando a uma altura de 20 metros em relação ao solo.

Existe a necessidade de dimensionar mecanicamente as estruturas consideradas, uma vez que os custos envolvidos nas estruturas estão directamente relacionados com os materiais apropriados para a construção das mesmas. No dimensionamento apenas serão considerados os limites máximos (carregamentos) suportados por cada tipo de elemento das estruturas e os deslocamentos máximos admitidos em construções metálicas destas dimensões [6], não considerando, numa primeira fase deste projecto, a eventual existência do fenómeno de encurvadura (estrutura treliçada) e o fenómeno de instabilidade local (estrutura tubular).

Pretende-se obter uma relação entre as dimensões dos materiais usados, bem como, a influência de cada parcela dos custos envolvidos nas diferentes estruturas consideradas.

Através da análise de custos espera-se poder escolher qual a melhor solução, optando por umas das duas estruturas estudadas, correspondente ao menor custo possível para o cliente, mantendo todos os requisitos presentes.

3 Caso de estudo

3.1 Dimensionamento das estruturas

Para que seja possível iniciar o dimensionamento das estruturas é necessário conhecer um pouco dos esforços a que as mesmas estão sujeitas, tanto os esforços mais previsíveis, como os que poderão ocorrer apenas em situações pontuais. Nestas situações podemos encontrar as estruturas expostas às mais elevadas cargas admitidas, dentro de limites já tabelados, uma vez que estas poderão ser possíveis numa situação de intempérie ou de alteração de transporte de um produto, mesmo que por um tempo reduzido. Em suma, a situação a estudar retrata uma situação limite.

Dentro deste capítulo serão abordadas as várias considerações ou restrições necessárias para o bom funcionamento e manutenção deste tipo de estruturas. Desta forma será separado em dois tipos, o relativo às estruturas treliçadas e às estruturas tubulares.

Nas estruturas treliçadas será escolhido de entre todos os perfis laminados existentes, o uso de tubos de secção quadrada e rectangular e nas estruturas tubulares serão consideradas chapas de aço laminado.

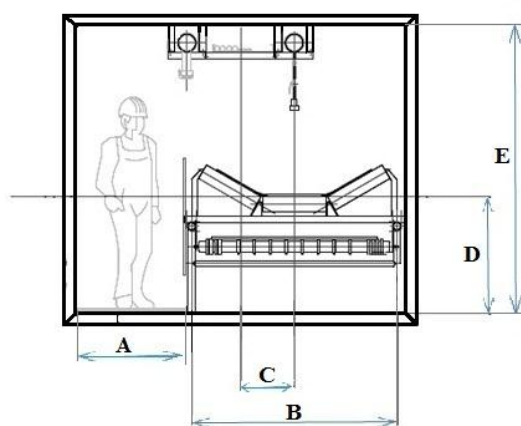
3.2 Estruturas treliçadas

Esta estrutura terá uma configuração semelhante a um paralelepípedo, em que as arestas e os vários troços da estrutura são constituídos por elementos barra (Fig. 3.1) de forma a aumentar a rigidez, uma vez que o espaçamento entre pés de suporte não poderá ser muito reduzido de modo a minimizar os custos de implementação de uma estrutura com estas dimensões.



Fig. 3.1- Estrutura Trelaçada

A estrutura deverá acomodar um tapete transportador em todo o seu comprimento bem como varias ferramentas e sistemas de protecção e controlo do mesmo, o que nos levará à necessidade de considerar um espaço útil para um operário (Fig. 3.2 e Fig. 3.3) de 800mm de largura (A) e 2500 mm de altura máxima (E).



A- largura da passadeira

B- Largura das estações de transporte

C- Distância do sistema de contra incendio relativamente ao plano vertical de simetria da estrutura exterior

D- altura de transporte do tapete

E- Altura máxima interior admitida

Fig. 3.2- Corte de secção de uma estrutura trelaçada

O espaço considerado é importante pela necessidade de se inspeccionar periodicamente o referido tapete transportador bem como proceder a algumas reparações no local.



Fig. 3.3- Exemplo de espaço de circulação no interior de uma estrutura treliçada

3.2.1 Tipos de treliças

Existem muitas possibilidades de execução de uma estrutura treliçada uma vez que não é imposta nenhuma restrição à configuração das mesmas. Dentro das principais destacam-se as Pratt, Warren, Howe e as suas variantes [7].

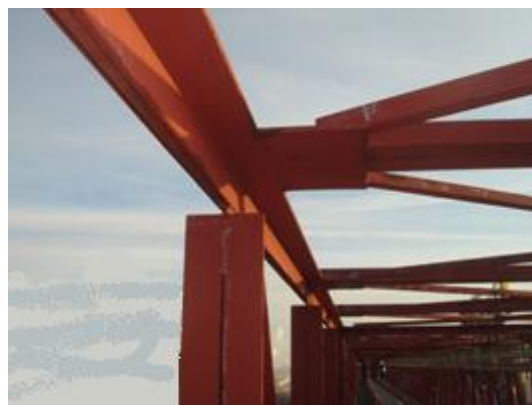


Fig. 3.4- Exemplo de treliças formadas por diferentes perfis

Neste estudo iremos focar apenas um dos dois tipos (Pratt) apresentados na Fig. 3.4, que contém treliças formadas por elementos de perfil tubular quadrado e rectangular (à esquerda) e perfis laminados e cantoneiras (à direita), sendo as da esquerda que serão consideradas neste estudo.

3.2.2 Junção de módulos

A estrutura existente entre dois pés de suporte não é construída por um único módulo, mas pela junção de vários, devido ao transporte dos mesmos para a fábrica cliente. Os módulos não são construídos no local onde vão ficar as estruturas alojadas, mas sim num estaleiro/armazém de uma empresa do ramo da construção metálica.

Desta forma, na fase de projecto, é necessário tomar decisões quanto aos sistemas a adoptar para se poder manter a rigidez pretendida, como para a fácil montagem no local. Esta montagem geralmente não é efectuada no solo mas sim no ar, o que leva à necessidade de facilitar a ligação dos elementos das várias estruturas com a menor complexidade possível para diminuir as hipóteses de ocorrência de desvios entre as duas extremidades a unir.



Fig. 3.5 – Ligações aparafusadas de módulos das estruturas

As ligações apresentadas na Fig. 3.5 permitem a correcta montagem e são de fácil aplicação, permitindo folgas quando são ligadas mas diminuindo estas quando devidamente apertadas.

3.2.3 Revestimento exterior

O revestimento é, normalmente, constituído por chapas lacadas ou zincadas ao invés de chapas de inox.

Embora as chapas de inox tenham a grande vantagem de não sofrerem oxidação proveniente da acção dos elementos exteriores sobre os seus constituintes químicos, têm a grande desvantagem do seu preço, que é muito superior comparado com a escolha de chapas lacadas ou zincadas.

As chapas laterais estarão sujeitas a cargas provocadas pela acção do vento segundo a sua perpendicular. O valor admitido para o peso das chapas será de $4,2\text{Kg/m}^2$ [8].



a)



b)

Fig. 3.6- Exemplos de chapas caneladas lacadas a) e zincadas b) [9]

Existem vários tipos de perfis no mercado, mas o mais usual neste tipo de estruturas é o apresentado na Fig. 3.6.

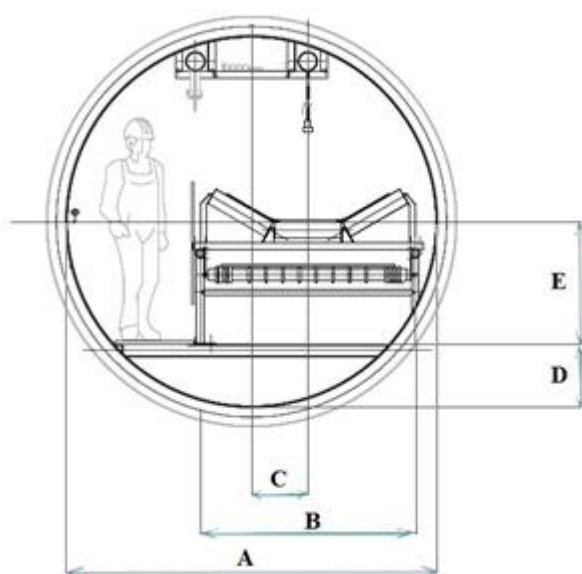
3.3 Estruturas tubulares

Nas estruturas tubulares é necessário ter em conta que a secção perpendicular ao comprimento não ser formada por zonas planas, levando à necessidade de criar uma plataforma de suporte dos pavimentos onde os operários se possam deslocar e servir de apoio para a estrutura do tapete transportador como de reforço para a própria estrutura (Fig. 3.7).



Fig. 3.7- Estrutura Tubular

O espaço necessário para os operários e acomodação do tapete transportador é igual ao escolhido para as estruturas treliçadas. De tal forma, a dimensão D (Fig. 3.8) terá de ser a suficiente para permitir a existência da zona de circulação dos operários sem que haja algum tipo de interferência com esta, dependendo do diâmetro escolhido para secção tubular como implementado na estrutura treliçada.



- A** – Diâmetro interior
- B** – Largura das estações de ida e volta
- C** – Distância do sistema de contra incendio relativamente ao plano vertical de simetria da estrutura interior
- D** – Distância entre a estrutura de suporte do pavimento e o ponto interior inferior
- E** – Altura de transporte do tapete

Fig. 3.8- Corte de secção de uma estrutura tubular

O tubo, troço da estrutura tubular, é obtido através de operações de calandragem de uma só vez ou por partes de chapas metálicas. Estas opções são importantes, uma vez que quanto menores forem as secções soldadas menor será a probabilidade de existência de imperfeições em toda a estrutura. Nas secções formadas por mais secções verifica-se a existência de varias “linhas” de cordão de soldadura, que poderão levar à maior probabilidade de existência de defeitos e o aumento do tempo de construção em comparação com a secção completa com apenas uma ou duas linhas de solda.

3.3.1 Junção de módulos

As junções são efectuadas pela adição de um anel (Fig. 3.9) à extremidade do “cilindro oco” formado por barras de aço curvado, sendo possível a colocação de parafusos de ligação entre duas secções consecutivas. Na modelação elaborada no Ansys não serão tomadas em consideração estas junções, como aplicado também nas secções treliçadas.



Fig. 3.9-Junção de módulos em estruturas tubulares

3.4 Tapetes transportadores

O tapete transportador permite efectuar o transporte de vários produtos de um ponto até outro de uma forma rápida e eficiente. Estes são compostos por muitos componentes estruturais e funcionais, nos quais encontramos os motores, tambores de comando e retorno, entre outros (Fig. 3.10).

Existem três zonas no tapete transportador onde se verifica a existência de componentes com um peso superior em relação aos restantes. Duas destas ficam situadas nas extremidades do tapete transportador (Zona de recepção e Zona de descarga) e a outra entre as duas referidas anteriormente (Zona de tensão do tapete).

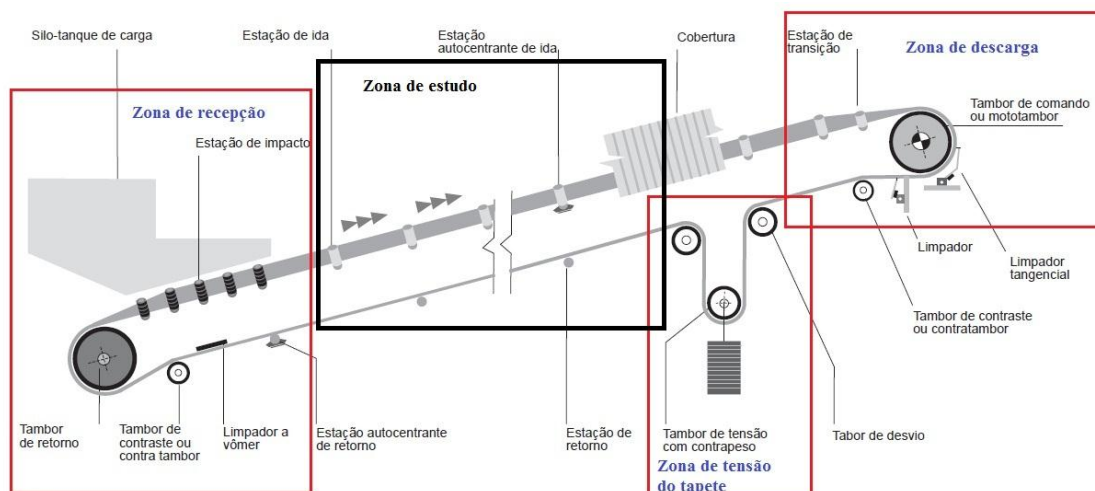


Fig. 3.10-Esquema do tapete transportador

Neste estudo será considerada apenas a zona intermédia do transportador, que é a que tem maior comprimento e a que tem maior influencia nos custos da estrutura que o irá suportar.

As extremidades do transportador e a zona de tensão da correia localizam-se, normalmente, sobre os pés de suporte, que serão devidamente dimensionados para o efeito, não transmitindo carregamentos à zona intermédia da estrutura.

Dado ser uma situação comum, a presença dos referidos equipamentos, a ambas as estruturas que estamos a considerar é valido admitir, uma eventual influência seria igual em ambos os casos e não afectaria a comparação entre elas.

Com os aspectos vistos anteriormente podemos considerar um comprimento de estudo fixo com o intuito de avaliar os dois casos apresentados para uma situação em muito semelhante. A medida escolhida para este estudo é de 100 metros de estruturas e que ao longo desta sejam presentes 4 pés de suporte igualmente espaçados (distanciados de 33,3 metros de cada um).

3.4.1 Material transportado

Para se poder definir um tapete transportador é necessário saber qual será o material a transportar.

O material escolhido para o desenvolvimento deste estudo é carvão mineral (Fig. 3.11), que contem um peso específico de aproximadamente $0,35 \text{ ton/m}^3$ e contendo um ângulo de repouso, em transporte, que varia entre os 30° e os 39° (Fig. 3.12).



Fig. 3.11-Carvão Mineral

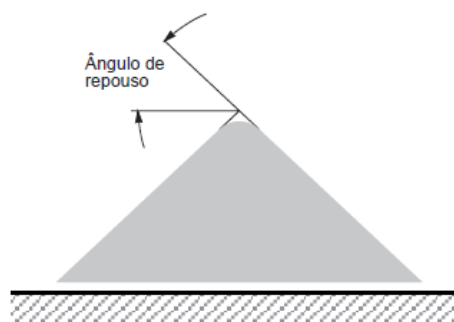


Fig. 3.12-Ângulo de repouso

Admitindo à partida, que serão usadas estações de ida de 3 rolos, com uma inclinação de 30° entre eles [10], valores de caudal volúmico transportado. Os valores encontrados são de $198,7 \text{ m}^3/\text{h}$ e $1363,3 \text{ m}^3/\text{h}$, considerando uma velocidade de transporte de 1 m/s , para as correias de 650 mm e 1600 mm , respectivamente.

As cargas geradas por este transporte ao longo da estrutura serão de $19,47 \text{ Kgf/m}$ e $133,60 \text{ Kgf/m}$ para as larguras de correias referidas, aproximadamente.

3.4.2 Correia do tapete transportador

Existem vários tipos de correias, cujas características variam com o material a transportar.

As mais comuns, para o carvão mineral, considerando grandes distâncias de transporte são compostas por correias de borracha, contendo no seu interior lonas e fibras têxteis ou filamentos metálicos permitindo a sua maior estabilidade quando estão sobre carga.

Como será efectuado o estudo de comparação entre duas larguras distintas de correias é necessário saber-se as tensões de ruptura das mesmas para cada situação. Segundo o catálogo de um fabricante de componentes para transportadores [10], tendo em conta que serão utilizadas estações de 3 rolos com uma inclinação de 30° , a correia de 650 mm tem uma tensão de ruptura de 1000 N/mm e a correia de 1600 mm de 1600 N/mm.

Para correias com introdução de filamentos metálicos [10] retira-se o peso de 9,5 Kgf/m² para a correia de 650 mm e 13,5 Kgf/m² para a correia de 1600 mm, sendo os carregamentos devidos ao peso das correias verificados tanto na zona de carga como na zona de retorno das correias.

Com os dados fornecidos pode-se obter o carregamento resultante do peso da correia na estrutura de suporte do tapete transportador. Os valores resultantes foram de 123,5 N/m para a correia de 650 mm e de 432 N/m para a de 1600 mm.

3.4.3 Estações de ida e retorno

Existem estações de ida (Fig. 3.13) de um, dois, 3 ou mais rolos. As mais usuais para o material escolhido são as de 3 rolos, uma vez que a cadência pretendida para este tipo de material é a mais elevada possível com largura de tela a mais reduzida. Considerando um ângulo de inclinação dos rolos, λ , (Fig. 3.14) pode-se estimar a cadência das estações referidas. Admitindo que este ângulo é de 30° , a capacidade em m³/h será de 198,7 para um tapete de 650 mm de largura e de 1363,3 para um tapete de 1600 mm de largura estamos em condições de retirar as estações que serão mais apropriadas para o efeito desejado.



Fig. 3.13-Estações de ida

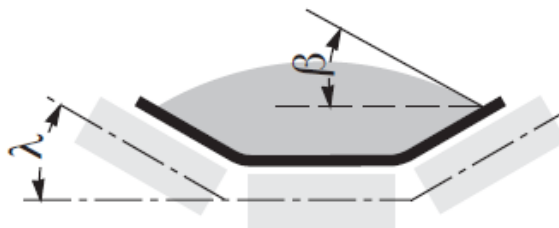


Fig. 3.14- Ângulos de inclinação (λ) dos rolos e de sobrecarga (β).

As estações de retorno podem ser de dois tipos. Estas diferenciam-se por conduzir a correia segundo um plano horizontal ou em dois planos, formando um “V”. Podem ser compostas um rolo metálico ou anéis de borracha de impacto ou pela possibilidade da conjugação dos dois apresentados (Fig. 3.15).

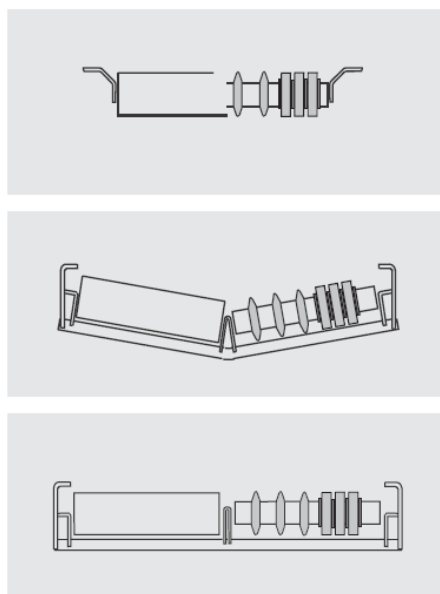


Fig. 3.15-Estações de retorno

Para as estações de ida foram escolhidos os modelos A3M e A3P [10] e para as estações de retorno as SPT 1478 e SPT 1495 [10]. Na Tabela 3.1 está contida informação sobre cada tipo de estações apresentadas:

Tabela 3.1 - Características das estações de ida e retorno.

Modelo das estações	Largura da correia (mm)	Ângulo entre os rolos (°)	Peso das estações sem rolos (Kgf)	Distância entre pontos de fixação (mm)
A3M	650	30	8,4	890
A3P	1600	30	31,5	1940
SPT 1478	650	0	0,7	890
SPT 1495	1600	0	4,6	1940

Também já é possível obter uma ideia de qual será a distância máxima permitida entre estações, através da tab.6 do catálogo [10]. Deste retiramos a seguinte informação:

Tabela 3.2 - Passos entre cada estação.

Largura da correia (mm)	Passo máximo considerado pelas estações (m)	
	Estações de ida	Estações de volta
650	1,65	3,0
1600	1,20	3,0

3.4.4 Rolos

Suportam o peso da correia e dos produtos transportados ao longo da linha de transporte. Estão divididos em 3 grupos, os de maior, os de média e os de menor carga. A sua dimensão é definida pela dimensão dos tapetes e pelas estações adoptadas.

Escolhendo rolos PSV1, que se podem acoplar às estações de ida e de retorno, exceptuando o caso com a correia de 1600 mm de largura que será usado um rolo PSV2 na estação de retorno. Os rolos escolhidos são os de 89 e 133 mm de diâmetro, como aconselhado para as larguras de correia escolhidas e uma velocidade de transporte inferior a 2 m/s (tab.16 [10]). Com esta informação, consultando os modelos de rolos apresentados obtêm-se os valores presentes na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Dados referentes aos rolos utilizados

Modelo das estações	Largura da correia (mm)	Tipo de rolo / diâmetro do rolo /mm)	Comprimento de cada rolo (mm)	Peso dos rolos (Kgf)
A3M	650	PSV1 / 89	258	3,0
A3P/5V	1600	PSV1 / 133	323	10,2
SPT 1478	650	PSV1 / 89	758	7,0
SPT 1495	1600	PSV2 / 133	1808	31,2

Com a conjugação dos pesos das estações e dos rolos chegamos a uma carga distribuída uniforme de aproximadamente de 13,20 e 63,70 Kgf/m para as larguras de correia de 650 e 1600 mm, respectivamente.

3.4.5 Estrutura de suporte do tapete transportador

Para todos os componentes do tapete transportador estarem nas suas devidas posições e não sofrerem algum tipo de deslocação imprevista leva a existência de uma estrutura capaz de suportar todas as cargas impostas pelos componentes do tapete transportador e a carga transportada. Não especificando o tipo de estrutura necessária para o efeito desejado, apenas consideraremos as cargas que impõem à estrutura treliçada ou tubular. O valor admitido será de 18 kgf/m para uma correia de 650 mm e de 25 Kgf/m para a de 1600 mm.

3.5 Cargas adicionais

Neste subcapítulo são referidas mais cargas presentes nas estruturas, uma vez que estas levam sempre à necessidade da existência de sistemas de iluminação, sistemas contra incêndios, passagem de cabos eléctricos, a existência de um corrimão na secção mais afastada do tapete transportador, os pavimentos com os respectivos suportes e a possibilidade de se encontrarem operários em alguns locais da estrutura.

Na Tabela 3.4 estão representados os valores admitidos para cada situação.

Tabela 3.4 - Cargas adicionais presentes nas estruturas.

	Cargas consideradas
Sistema de iluminação	1 Kgf/m
Sistema contra incêndios	20 Kgf/m
Cabos eléctricos	10 Kgf/m
Corrimão	10 Kgf/m
Pavimentos e suportes	28 Kgf/m

Relativamente à presença de operários no interior da estrutura será considerada a sua localização na estrutura a meio de um vão da estrutura entre dois pés de suporte (ponto mais crítico). Esta situação seria provocada pela necessidade de manutenção de um componente do tapete rolante e que o peso estimado de cada operário seria de aproximadamente 100 Kgf. Para que se transmita a situação de uma reparação, mesmo que em condições não muito favoráveis para o mesmo, as cargas neste caso são consideradas a triplicar, reflectindo a existência de dois funcionários com algum material adicional, e sendo aplicada em ambos os lados da estrutura.

3.6 Simplificações assumidas

Para este estudo conceptual foram admitidas as seguintes simplificações:

- A comparação entre os tipos de estruturas incidiu na parte intermédia dessas estruturas, uma vez que esta é a parte que tem maior influência nos custos;
- Não foram considerados os pés de suporte, os reforços necessários e as ligações aos pés de suporte, assim como, não foram consideradas as extremidades dos transportadores, dado que o impacto destes factores nos custos será idêntico para ambos os tipos de estrutura;
- Para a estrutura tubular foram assumidas as hipóteses admitidas na teoria da flexão de vigas rectilíneas;
- Para a estrutura treliçada foram assumidas as hipóteses admitidas na teoria das treliças [7];
- Os carregamentos admitidos são iguais para os dois tipos de estruturas, excepto o carregamento proveniente da acção do vento, para o qual foram considerados os coeficientes de arrasto aplicáveis a cada situação.

4 Construção dos modelos em ANSYS

Para se poder realizar esta análise será necessário recorrer a um programa que permita construir e simular as estruturas pretendidas. Com a possibilidade de fornecer uma resposta encontramos o programa Ansys que corresponde plenamente às necessidades construtivas e de avaliação.

Para se poder utilizar este software é necessário ter em conta conhecimentos de várias disciplinas aprendidas no curso de engenharia mecânica. Este permite a resolução gráfica de um objecto/estrutura desejado(a) mesmo que este(a) seja de um grau de complexidade elevado.

Dentro da arquitectura do Ansys encontra-se uma linguagem específica (APDL) que facilita, muitas vezes, a resolução dos estudos requeridos. Esta ferramenta permite que o utilizador encontre algum erro durante a construção com uma maior rapidez e facilidade, isto quando os programas são extensos, caso contrário é preferível usar a interface gráfica do software. O contacto pré existente simplifica o desenvolvimento da estrutura, no caso, e por vezes facilita a obtenção de resultados sem a ocorrência de erros ou proporcionar uma maior rapidez em encontra-los.

Na avaliação das estruturas serão consideradas as tabelas informativas dos Eurocódigos ([11] [6]) e relativamente às cargas geradas pelo vento serão considerados os Coeficientes de arrasto [12] sobre as estruturas.

4.1 Criação dos Modelos

Para se iniciar esta fase é necessário ter uma ideia do que será possível e o que é objectivo alterar (variáveis do projecto) nos modelos, com vista a simplificar a construção das estruturas, uma vez que será estudado o impacto da variação de alguns parâmetros. Desta forma foi necessário ajustar a cada tipo de estrutura a modelar os requisitos necessários (Capítulo 3), bem como todos os parâmetros relevantes no seu dimensionamento de modo a tornar-se a avaliação quase automática quando se alteram os parâmetros principais deste projecto.

Em ambos os modelos foi escolhida a construção de forma simplificada, isto é, a representação dos materiais constituintes, como chapas e vigas, são representados por áreas ou linhas, respectivamente.

Para cada estrutura serão admitidas as simplificações referidas resultando nas Fig. 4.1, Fig. 4.2 e Fig. 4.3, onde as linhas a traço-ponto são apenas linhas de construção.

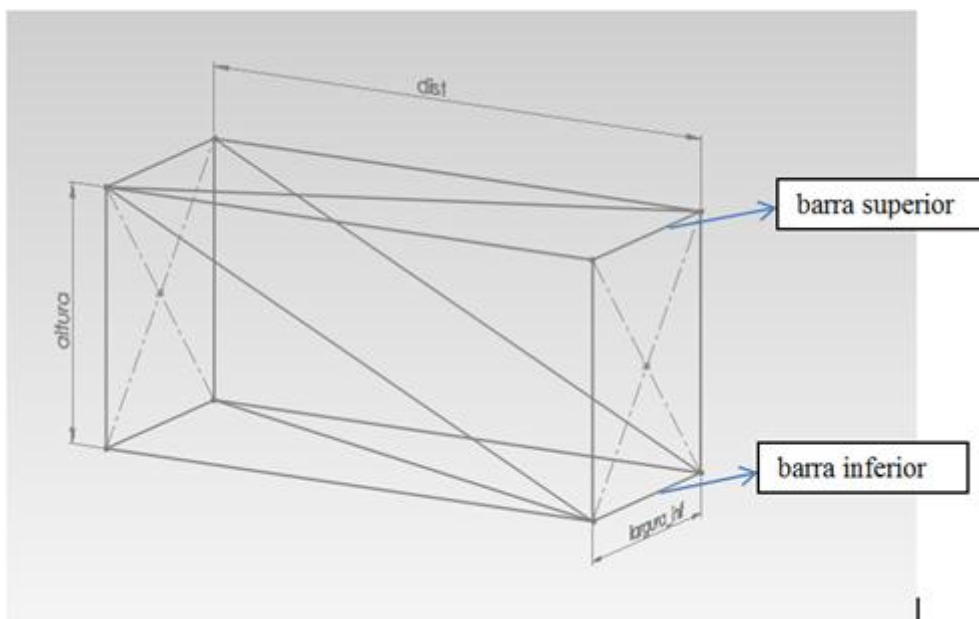


Fig. 4.1-Modelo de construção da estrutura treliçada.

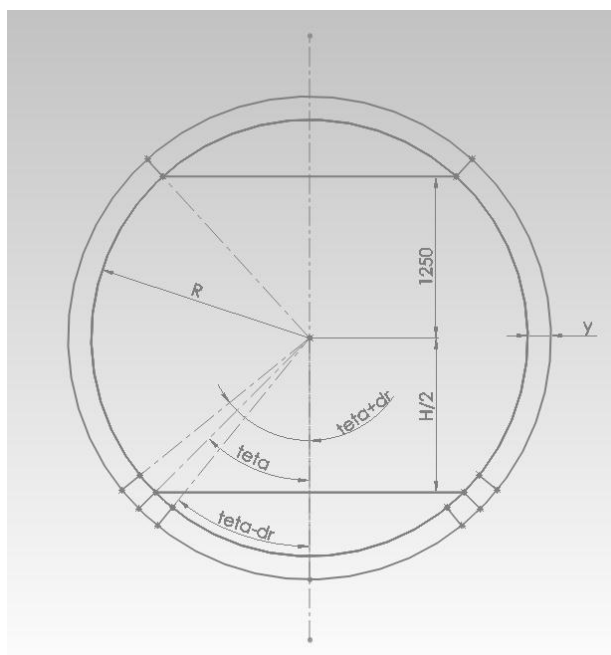


Fig. 4.2-Secção frontal do modelo de construção da estrutura tubular (mm).

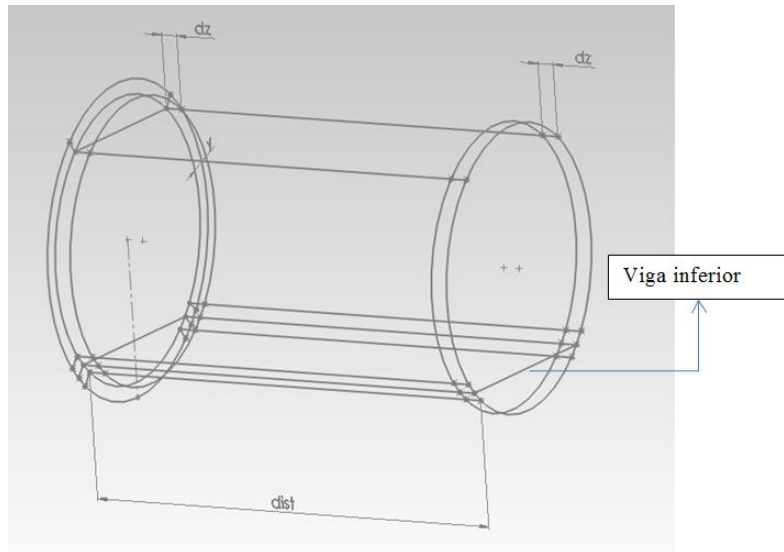


Fig. 4.3-Secção lateral do modelo de construção da estrutura tubular.

4.2 Escolha dos Elementos

Com base no que já foi apresentado anteriormente, a escolha dos elementos recai sobre os elementos: BEAM188, SHELL181 e LINK180.

O BEAM188 e o SHELL181 são utilizados na construção da estrutura tubular e o elemento LINK180 é o escolhido para simular as barras da estrutura treliçada.

Segundo o tutorial de ajuda do Ansys [13] podemos descrever um pouco cada elemento escolhido:

- BEAM188:

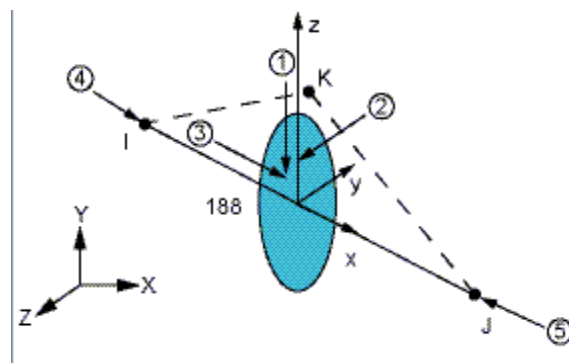


Fig. 4.4-Geometria do elemento BEAM188 [13].

O elemento é definido por dois nós (i e j) e é adequado para o estudo de estruturas constituídas por vigas esbeltas. Possui 7 graus de liberdade, sendo o 7º opcional (magnitude de empeno) e os restantes associados à translação e à rotação. As linhas que definem esses

elementos são delimitadas por pontos criados segundo a circunferência inicial da estrutura apresentada. Na estrutura que está inserido está a servir de reforço/ suporte da passareira e estrutura do tapete, dando um momento de inércia global na proximidade superior na zona onde se encontra.

Para definir este elemento é necessário construir áreas e atribuir dados como as espessuras, a altura, as larguras, a elasticidade e o coeficiente de Poisson.

- SHELL181:

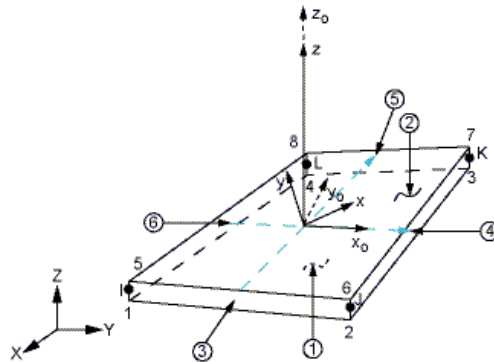


Fig. 4.5-Geometria do elemento SHELL181 [13].

Este elemento é adequado para o estudo de estruturas do tipo casca. É um elemento de 4 nós (i,j,k,l) com 6 graus de liberdade em cada nó, à semelhança do elemento BEAM188, exceptuando o 7º grau de liberdade. Para definir este elemento é necessário construir áreas e atribuir dados como a espessura, a elasticidade e o coeficiente de Poisson.

- LINK180:

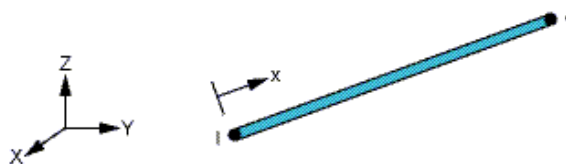


Fig. 4.6-Geometria do elemento LINK180 [13].

O elemento substitui as barras na construção, tendo o mesmo comportamento na análise que as barras de uma treliça, apenas permitindo que estas tenham carga segundo a sua linha de eixo, estando à compressão ou à tracção.

Para se definir este elemento basta construir nós que se possam unir por elementos de barra em ambiente ANSYS e atribuir as constantes reais desejadas e permitidas. A constante real de relevo neste estudo é a área da secção das barras e a natural necessidade de atribuir o Módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a densidade do aço uma vez que se pretende adicionar aos cálculos realizados pelo software o efeito do peso na estrutura. De igual forma como os elementos antes apresentados este possui 3 graus de liberdade (deslocamento e rotação) em cada nó.

4.3 Secção Trelaçada

Na estrutura composta por elementos trelaçados, formando uma treliça tridimensional, é fácil de construir o modelo escolhido, uma vez que as dimensões a alterar não interferem com as restantes presentes na mesma (existe independência de dimensões segundo as que se pretendem alterar), através da programação escrita em APDL (ANEXO IV).

Como modo de iniciação da construção, partiu-se por desenhar as linhas que formam o anel rectangular da estrutura (Fig. 4.7), vista isométrica. As coordenadas dos pontos apresentados foram retiradas do trabalho já desenvolvido anteriormente de forma a corresponder a todos os requisitos considerados relevantes para a mesma. Na imagem é possível ver a distância em relação ao referencial (considerado o referencial do nível do solo) dos nós criados para os limites das barras do referido anel.

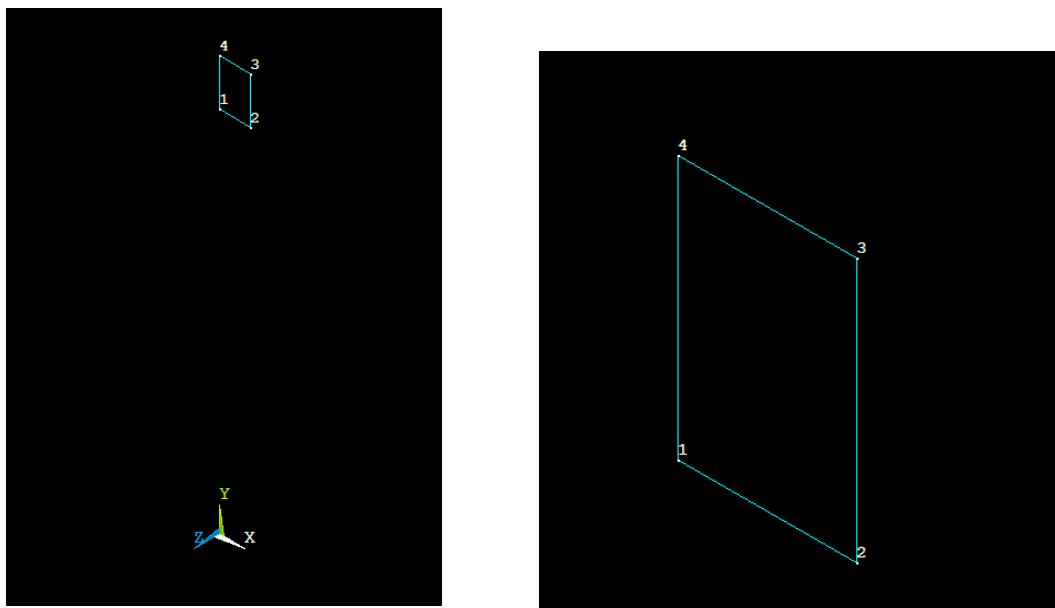


Fig. 4.7-Anel primario (rectangular) da construção da secção trelaçada

De seguida passou-se por gerar várias secções iguais à anteriormente apresentada (Fig. 4.8), uma vez que serão todas iguais, tendo em atenção que o número de secções geradas tem influência directa do número de subsecções admitidas (**M**), uma vez que com o aumentar do número de secções os comprimentos das barras ou perfis irão diminuir ou aumentar de acordo com o aumento ou diminuição do valor de **M**, respectivamente.

O termo **M** apenas representa metade do número de secções presentes entre cada apoio. No capítulo correspondente à aplicação de cargas e restrições (Capítulo 4.8) serão adicionados aos devidos nós da estrutura.

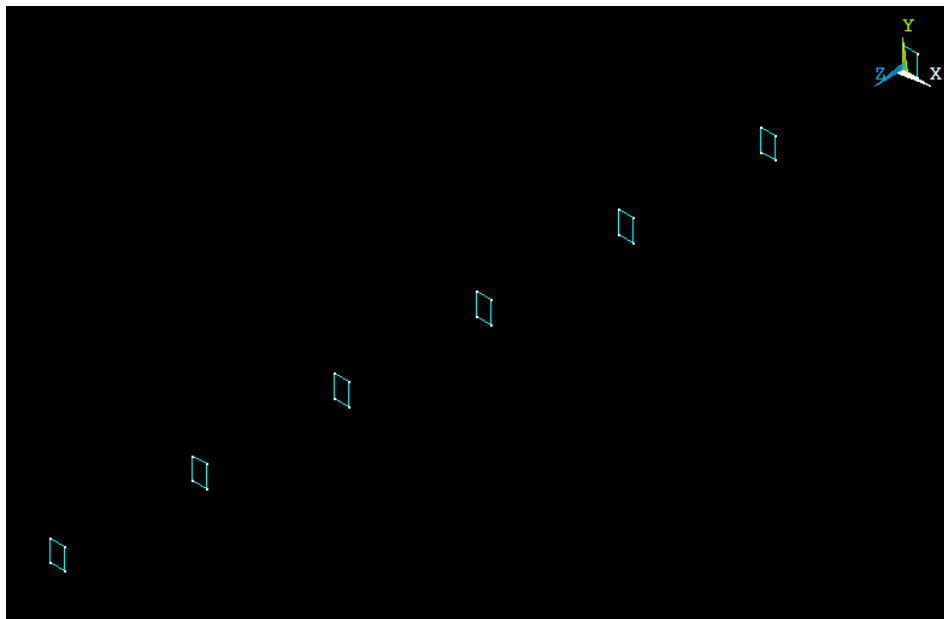


Fig. 4.8-Geração de anéis iguais ao inicial.

Com os anéis já criados é necessário unir os vértices, formados por nós, com linhas que também representarão barras. Esta união de pontos será sequencial, como é possível ver pelo código elaborado na Fig. 4.9, em que **J** representa uma variável com a capacidade de correr a sequência pretendida de 1 até $4*n$, que se refere ao numero de nós existente em toda a estrutura.

```
*Do,J,1,4*n
    EN,J+4+4*n,j,j+4
*ENDDO
```

Fig. 4.9-Código da geração das linhas longitudinais da estrutura.

Como resultado surge uma “grelha” que une todos os pontos que estão na mesma cota (Fig. 4.10).

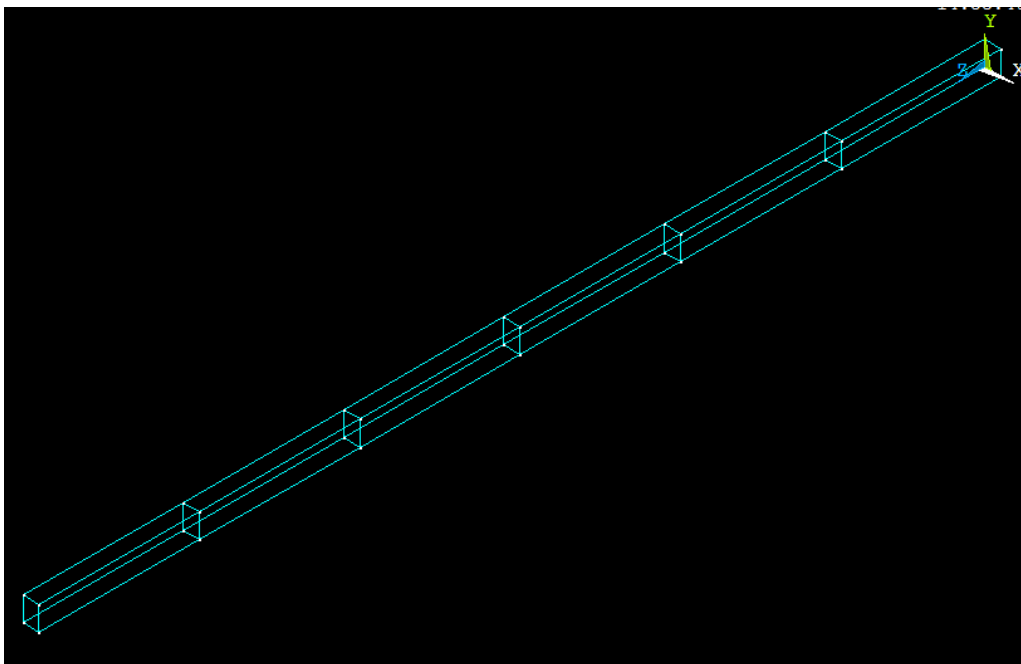


Fig. 4.10-União dos anéis criados.

No passo seguinte foi necessário ter em atenção a construção geométrica da estrutura, uma vez que nas estruturas treliçadas é preferível manter as barras de maior comprimento que a constituem, expostas a esforços de tracção em vez de compressão, prevenindo a ocorrência do fenómeno de instabilidade por encurvamento de vigas [7]. Desta forma foi necessário construir uma sequência de ligação de pontos, por meio de linhas, de modo a que a metade do vão mudassem de orientação, para a sua oposta, formando um “V” na secção central do vão nos planos verticais (Fig. 4.11), deixando a existência de barras à compressão na zona dos apoios (linhas verticais sobre os apoios). Nesta zona é esperada a existência de um maior deslocamento dos nós em relação aos pontos iniciais e com esta a possibilidade de maior carga resistiva devido às cargas consideradas, constantes ao longo de toda a estrutura excepto nas zonas onde se irá colocar as cargas da existência de funcionários de manutenção. Segundo métodos construtivos, que vão estar directamente ligados ao termo M, a inclinação das barras diagonais deve estar compreendida entre os 35° e os 55° [14].

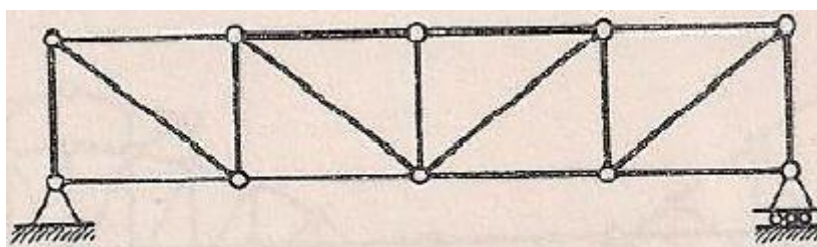


Fig. 4.11-Orientação das barras verticais da estrutura.

Por fim é necessária a construção da treliça horizontal que irá responder, principalmente às solicitações provocadas pelo vento. Para responder a este requisito existem variadas configurações possíveis (Fig. 4.12). Os pontos que aparecem a vermelho representam os nós da estrutura treliçada.

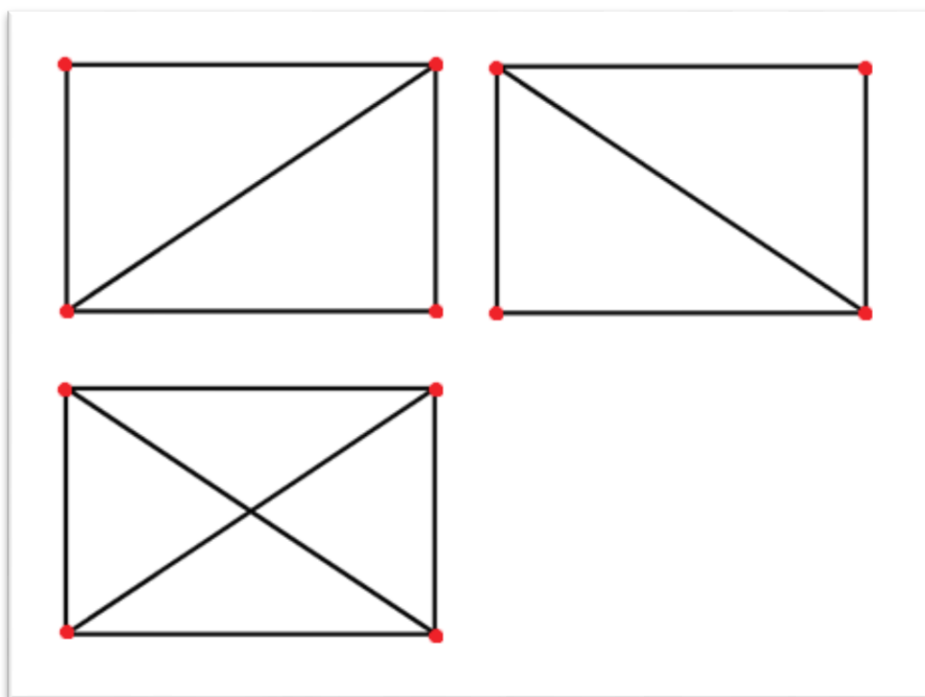


Fig. 4.12-Várias configurações de barras diagonais.

Para esta apenas foi definido que se iriam colocar as treliças com a direcção oposta uma da outra (Fig. 4.13), contendo apenas uma barra transversal, uma vez que a pressão resultante da acção do vento, na realidade, varia de direcção pelo que seria necessário conhecer referências sobre os ventos predominantes na região de implementação da estrutura.

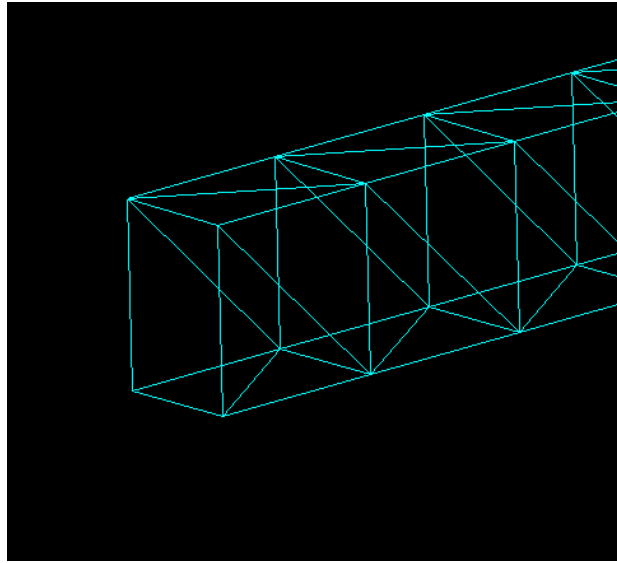


Fig. 4.13-Estrutura construída em Ansys já concluída.

Com esta fase terminada já é possível proceder à aplicação das cargas e restrições ao longo de toda a estrutura.

4.4 Secção Tubular

Nesta estrutura de secção circular não se verifica a independência de cotas, sendo necessário proceder à experimentação geométrica em ambiente de desenho computacional por forma a se conseguir obter um melhor aproveitamento do espaço interior da estrutura. Destas experimentações foi decidido recorrer a uma regressão linear para se obter o raio da estrutura com a variação da largura de tapete transportador, uma vez que a superfície não é plana, mas sim curvilínea, o que leva a um estudo do espaço interior, de modo a poder minimizar-se este espaço da melhor forma para a alteração de dimensões pretendidas no estudo.

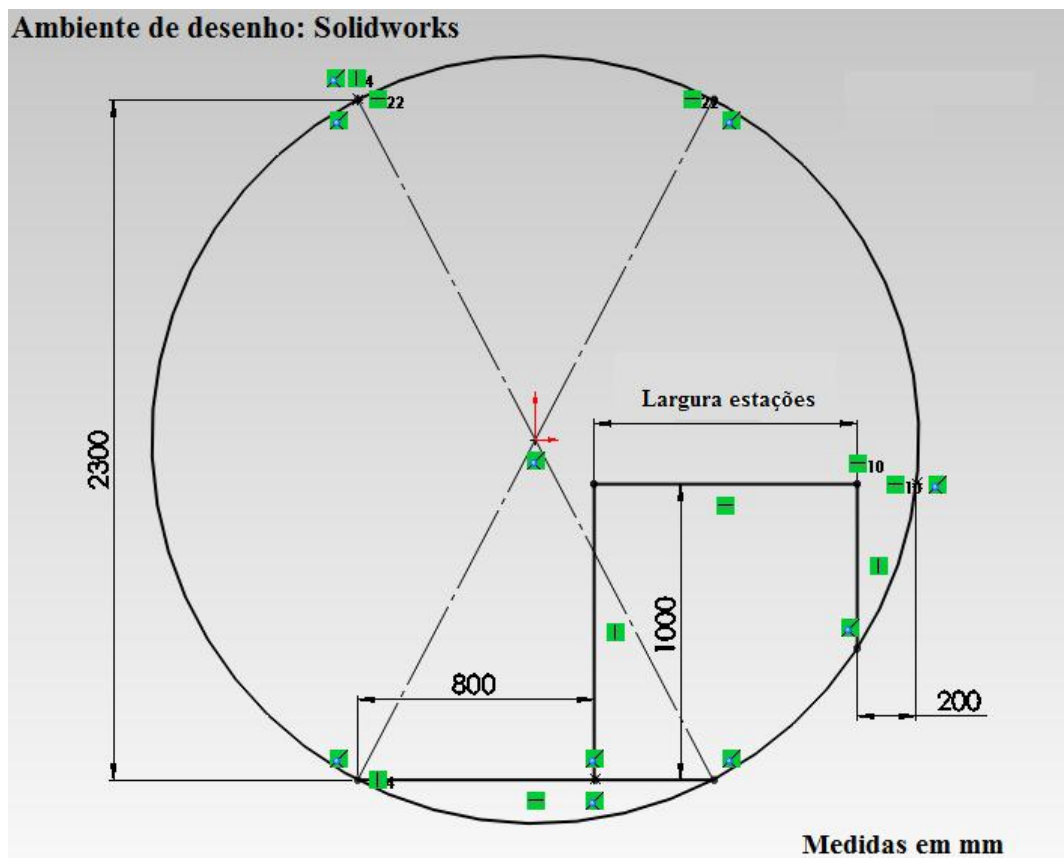


Fig. 4.14-Dimensionamento da secção transversal da estrutura tubular.

Nota: Existem barras na figura que não foram representadas (barras de suporte dos equipamentos adicionais colocadas na parte superior, estando a 2300 mm da passadeira e que estão ligadas à superfície superior da estrutura).

Com o esquema construído na Fig. 4.14 é possível, mudando os valores das larguras das estações e limitando algumas distâncias dentro da mesma, obter uma previsão do melhor aproveitamento que se pode obter no final.

Com esta avaliação é possível colocar, na construção da programação em APDL, o raio da circunferência que define a superfície tubular em função da largura das estações dos tapetes transportadores, facilitando assim a escrita dos parâmetros e tornando assim o programa quase automático no que se refere à alteração dos dados considerados fulcrais para o desenrolar do estudo desta estrutura.

Tabela 4.1- tabela com o valor dos diâmetros do “tubo” da estrutura em função da largura das estações.

Largura das estações (mm)	Diâmetro do “tubo” (mm)
800	2540,0
900	2601,6
1000	2666,9
1100	2735,5
1200	2807,0
1300	2880,9
1400	2956,9
1500	3034,9
1600	3114,5
1700	3195,6
1800	3278,0
1900	3361,7
2000	3446,4

Dos dados retirados da Tabela 4.1 é possível construir o gráfico apresentado na Fig. 4.15 de forma a retirar a relação do raio da estrutura com a variação da dimensão das estações adoptadas para a estrutura.

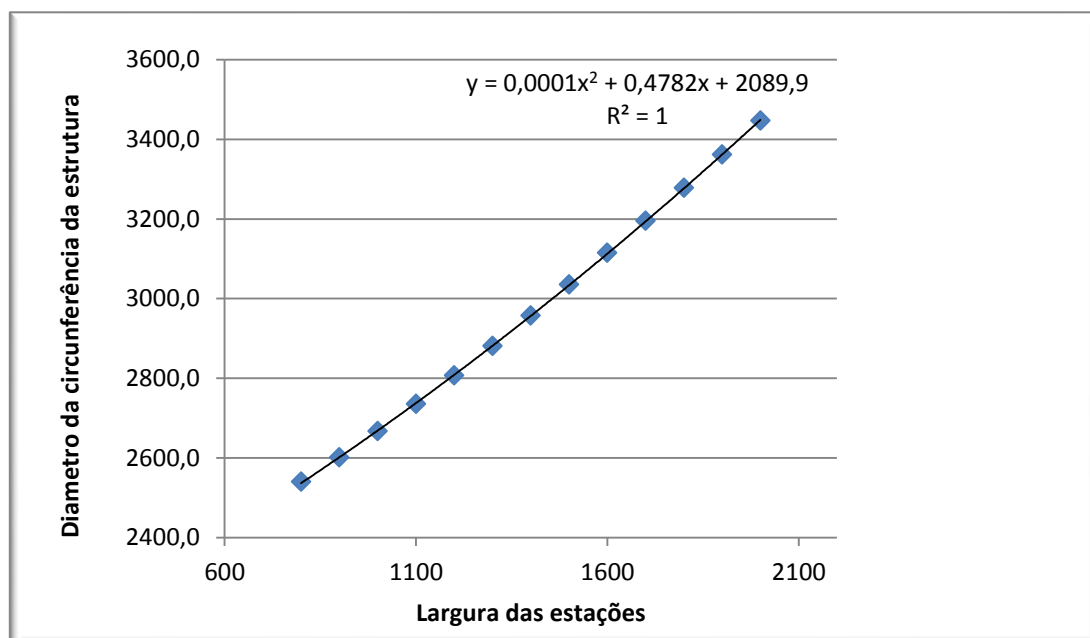


Fig. 4.15-Regressão linear do diâmetro da circunferência em função da dimensão das estações.

Com o acesso aos valores retirados da Fig. 4.15 já estamos em condições de começar a construir as linhas que irão servir de orientação à composição das áreas de que necessitamos para representar as chapas que constituem esta estrutura.

Através da programação em Ansys (ANEXO VI), para a concepção da estrutura, iniciou-se pela criação dos pontos mais relevantes, semelhante à estrutura treliçada, não formando desde logo a superfície circular final, uma vez que com a alteração da largura do tapete transportador são alteradas quase todas as outras. Adicionando mais pontos de forma a se construírem áreas (Fig. 4.16,a) e b)) e efectuando a divisão das áreas por sobreposição umas das outras (Fig. 4.16,c)) encontramos a forma de que cada vez que é alterada uma dimensão se irá gerar pontos de intersecção das áreas construídas de forma a estes estarem sobre o círculo inicialmente construído (Fig. 4.16,d)).

Com o processo anterior terminado é necessário definir novos pontos, em que estes, sim, já estejam sobre a superfície circular do tubo cilíndrico final.

Para a construção de um círculo à altura considerada é indispensável a criação de um novo referencial. O novo referencial vai ter coordenadas cilíndricas como base para se conseguir colocar os ângulos pretendidos e dar a profundidade desejada a quando da geração de mais subsecções, como verificado com a construção da estrutura tubular.

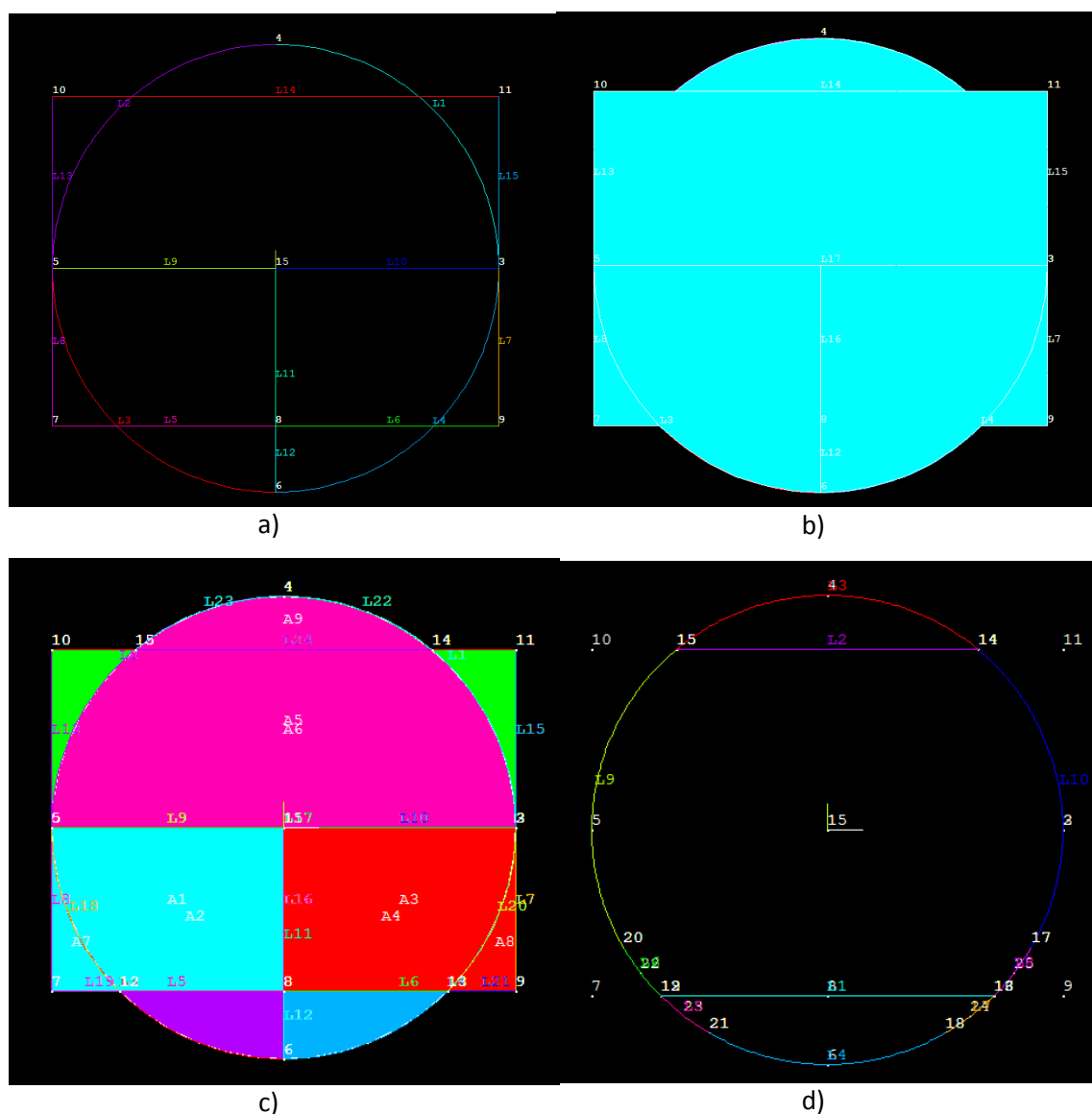


Fig. 4.16-Evolução da construção de linhas orientadoras para a construção do círculo primário.

Com a fase inicial concluída ficou-se em condições de se prosseguir com a geração das linhas para formar os limites das subsecções consideradas. Nas estruturas foi considerada uma zona de reforço, representado graficamente por um anel com uma dada largura (dz).

A sua admissão irá ser importante na fase de análise dos resultados obtidos (secção 7), uma vez que foi considerada a não avaliação das zonas perto dos apoios da estrutura. Com o código presente nos anexos (ANEXO VI) consegue-se reproduzir as secções com os anéis considerados delimitadores de subsecção bem como os anéis que representam as zonas limitadoras dos reforços (Fig. 4.17).

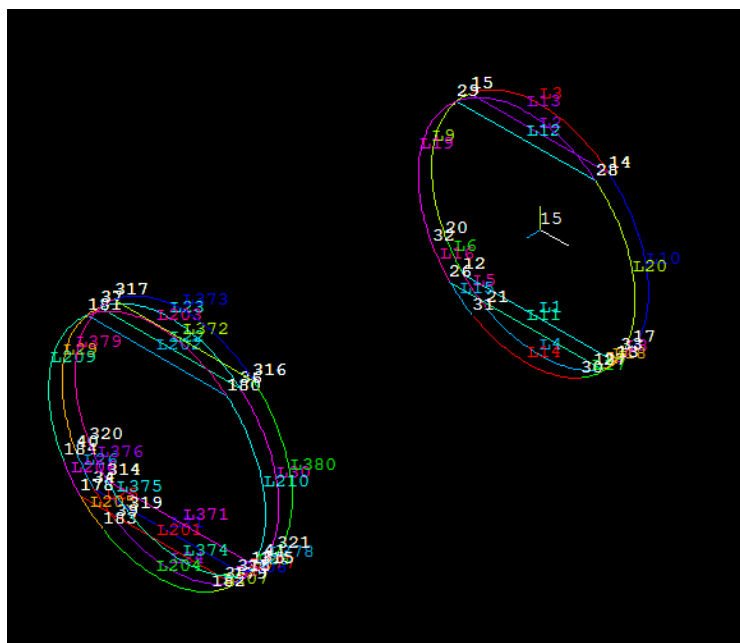


Fig. 4.17-Exemplo da geração dos anéis da estrutura tubular.

Com os anéis já concluídos é necessário unir os pontos segundo as mesmas cotas (eixos x e y) ao longo de todo o comprimento (eixo z) por forma a gerar áreas regulares (formadas por 4 linhas e 4 pontos) ao longo de toda a estrutura facilitando depois a refinação destas.

Com as linhas já construídas decidiu-se criar os pontos necessários para a geração dos anéis de reforço. Para que não existam problemas de numeração entre os pontos já criados e os pontos que irão formar os anéis de reforço optou-se por começar uma nova numeração superior à existente na estrutura já construída. A posição dos pontos que servirão para representar os limites das vigas que suportam a estrutura estão delimitados pelo ângulo “teta”, permitindo assim a fácil alteração da posição dos mesmos.

4.5 Zonas de reforço

As zonas apresentadas referem-se a zonas onde se observa o reforço, na prática, da estrutura por meio de chapas espessas que assegura a não deformação da mesma nestes locais (Fig. 4.19).



Fig. 4.19-Zona de reforço / apoio da estrutura.

As áreas indicadas, normalmente, encontram-se nas zonas dos apoios. Estas zonas são mais sensíveis pelo facto de serem responsáveis pela descarga/transmissão de esforços (tensões) da estrutura para a superfície pelo meio dos postes/estruturas de apoio. A admissão destes pormenores leva-nos a considerar que na zona assinalada existirá uma possível concentração de tensões em toda a zona, nas soluções gráficas. Estes reforços vêm aumentar a resistência à flexão e reforçar a resistência à instabilidade.

De acordo com a construção foi admitido que não seriam representadas as zonas de reforço que liga os diferentes módulos consecutivos (Fig. 4.20), pois estas zonas não serão razão para que a estrutura não suporte as cargas aplicadas, uma vez garantida a resistência ao longo destas sem a existência destes anéis.



Fig. 4.20-Anel de ligação de secções.

4.6 Restrições nos apoios

Com a estrutura já construída é necessário, agora, aplicar os constrangimentos de modo a representar o que se passa na realidade, ou muito perto desta. A aplicação de constrangimentos é de extrema importância, uma vez que uma escolha incorrecta poderá conduzir a resultados indesejados. Nesta fase é necessário, como em muitas outras entrar com hipóteses simplificativas de cálculo. Para iniciar foi essencial considerar que os apoios de início da estrutura estão numa zona de transfega (Fig. 4.21) ou numa zona onde se encontram os limites de um armazém (Fig. 4.22) que tem uma estrutura muito sólida levando a considerar que não existirão deslocamentos em qualquer direcção (X, Y e Z) nos pontos de apoio.



Fig. 4.21-Zona de transfega.



Fig. 4.22-Ligação da estrutura a um armazém.

Nos restantes apoios (Fig. 4.23) observamos que são constituídos por suportes com a altura a que se deseja colocar as estruturas treliçada ou tubular. Desta podemos considerar que estes apenas conseguem garantir a existência de um deslocamento muito reduzido segundo os eixos X e Y considerados nos modelos elaborados em Ansys.



a)



b)

Fig. 4.23- Apoios de suporte das estruturas a) treliçada e b) circular

Numa das laterais de cada estrutura foi considerado o não deslocamento dos pontos/nós das estruturas segundo a sua longitudinal (eixo Z).

Para o caso da estrutura treliçada ainda foi necessário restringir os deslocamentos dos nós localizados no plano vertical em cada pé de suporte, referente ao contrário da aplicação das cargas geradas pela acção do vento nas barras superiores. Nesta estrutura a opção apresentada tem um peso maior, uma vez que as vigas que compõem os anéis rectangulares teriam de ser estudados separadamente de forma a garantir que estes poderiam manter a rigidez da estrutura como fora admitido. As vigas referidas teriam de ser reforçadas, como se observa na realidade, em que estas têm uma dimensão superior às restantes escolhidas (Fig. 4.24).



Fig. 4.24-Zona de apoio de uma estrutura treliçada.

Com as restrições apresentadas é possível ter uma boa aproximação do que se verifica na realidade como já foi referido anteriormente.

4.7 Refinação da malha

Nesta fase, apenas indicada para a estrutura tubular, é necessário ter áreas criadas para que seja possível realizar este procedimento. Da criação de áreas adoptada é possível, à margem de outras acções já tomadas, elaborar sequências que consigam simplificar a refinação das nossas áreas por elementos. É possível a alteração da espessura da chapa em algumas zonas, permitindo assim definir as zonas de reforço necessárias para a estabilidade das mesmas. Devido ao cuidado tomado à priori é admissível usar a refinação automática da malha utilizada no software, permitindo assim a simplificação do processo.

Como resultado desta acção temos a criação de elementos quadrados delimitados por nós onde se irá medir as tensões e deslocamentos resultantes da aplicação das cargas e constrangimentos admitidos no problema.

A refinação das linhas que representam as vigas é um pouco diferente uma vez que é indispensável a existência de linhas construídas para se proceder à sua divisão por elementos com as características das vigas pretendidas. No método adoptado apenas basta a selecção das linhas que interessam, visto que foram criadas muitas a partir do círculo inicial (zonas de secção e de delimitação da largura dos reforços à direita e esquerda das mesmas), pois este já tinha

inseridas as vigas de reforço e as que representam os apoios superiores dos materiais adicionais nas estruturas na sua planificação.

4.8 Aplicação de cargas

4.8.1 Cargas distribuídas

Iniciando com o resumo do que já foi apresentado anteriormente no Capítulo 3 referente a um exemplo modelo. O resultado é visível nas seguintes tabelas, Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 4.2-Cargas nas duas correias consideradas.

	Correia de 650 mm (N/m)	Correia de 1600 mm (N/m)
Material transportado	194,7	1336,0
Correia	123,5	432,0
Rolos e estações	132,0	643,4
Estrutura de apoio tapete	180	250
Totais	630,2	2661,4

Tabela 4.3 – Cargas adicionais e extra tapete transportador.

	Carga
Cargas adicionais superiores	10 N/m
Funcionários	1000 N
Corrimão	100 N/m

Com as cargas já encontradas é necessário associar estas aos pontos ou nós de aplicação tendo em atenção as geometrias das secções apresentadas. De forma a facilitar a introdução das cargas em relação às várias características assumidas, decidiu-se encontrar as expressões que simplifiquem a sua aplicação. Uma forma muito rápida e simples é a introdução das funções

“If” que permitem associar uma carga a uma determinada característica na programação seguida.

No caso da estrutura treliçada foi considerado que as forças aplicadas em cada nó correspondem às reacções nos apoios das vigas (barras inferiores da estrutura), tratando-as como vigas simplesmente apoiadas, resultantes dos carregamentos aplicados sobre elas, uma vez que método dos nós pressupõe que as barras apenas podem suportar esforços de tracção ou compressão [7] e não momentos flectores.

No caso da secção tubular, esta aproximação será também admitida, pelo que não vamos estudar a resistência da viga interna da estrutura, mas sim atribuir-lhe dimensões que à partida suportem os esforços presentes sobre esta. Esta simplificação leva a que se considere também o efeito das cargas apenas nas extremidades da viga referida, Fig. 4.25, sabendo que a barra/viga referida é a correspondente à barra inferior (Fig. 4.1) e à viga inferior (Fig. 4.3) dos respectivos modelos.

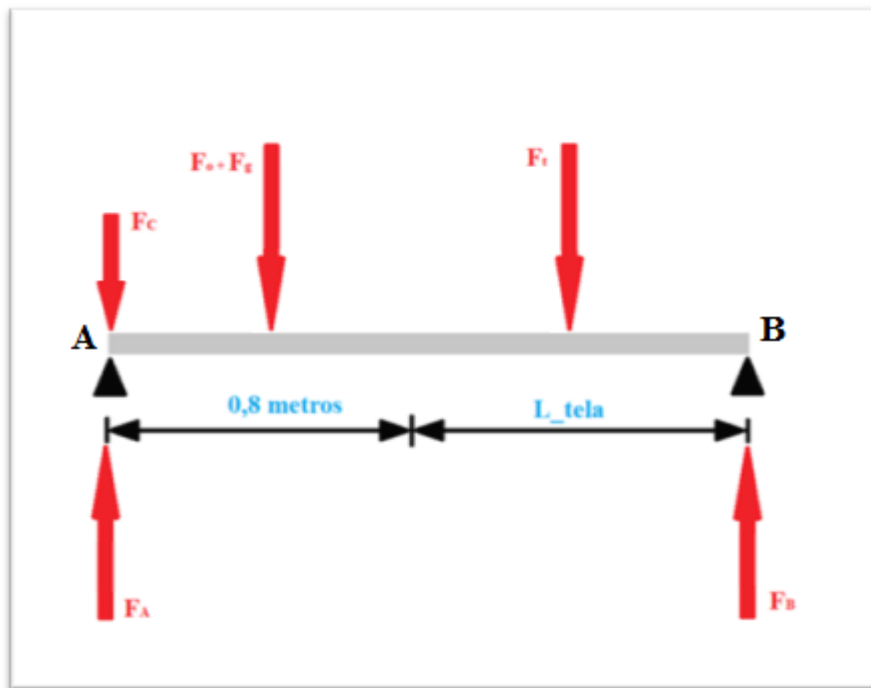


Fig. 4.25-Disposição de cargas nas barras inferiores.

Realizando as equações de equilíbrio de forças na viga consideradas obtemos as seguintes expressões, sabendo que $F_o + F_g$ e F_t estão aplicadas a meio da passadeira com 0.8 metros e da largura de correia (L_{tela}), respectivamente:

$$\sum F_Y = 0 \Rightarrow FA + FB = F_c + F_o + F_g + F_t$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -(F_o + F_g) * 0,4 - F_t * \left(0,8 + \frac{L_{tela}}{2}\right) + F_B * (0,8 + L_{tela}) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_B = \frac{(F_o + F_g) * 0,4 + F_t * \left(0,8 + \frac{L_{tela}}{2}\right)}{0,8 + L_{tela}}$$

$$\Rightarrow F_A = F_C + F_o + F_g + F_t - F_B$$

A carga F_o apenas é considerada para uma situação muito especial, referente à adição da força exercida no meio vão da estrutura entre apoios, levando à sua não existência nos restantes nós ou pontos aplicados.

Nas barras/vigas superiores (Fig. 4.26) a situação é muito semelhante à apresentada anteriormente.

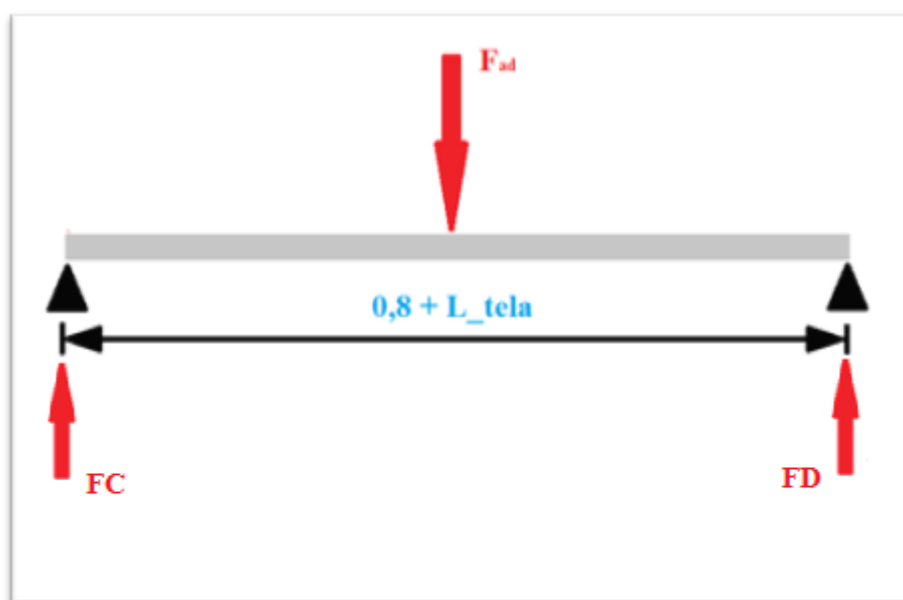


Fig. 4.26-Disposição de cargas nas barras superiores.

Considerando também para este caso que a força está aplicada a meio do vão da viga, caso de simetria, conclui-se que:

$$F_C = \frac{F_{ad}}{2}$$

$$F_D = \frac{F_{ad}}{2}$$

Estas cargas serão aplicadas nos nós superiores na estrutura treçada, situando-se a cerca de 2500 mm da parte inferior da estrutura (passadeira). Para a situação da estrutura tubular decidiu-se colocar a aplicação desta cargas, nos pontos gerados a cerca de 2450 mm da viga da

passadeira, ficando a linha que une estes dois pontos (Fig. 4.2) a uma distância de 1250 mm do centro da circunferência considerada.

Para a estrutura treliçada falta ainda definir a carga gerada pela adição das chapas de isolamento existentes na estrutura. Nos cálculos será considerado que a estrutura estaria toda envolta com as referidas chapas, facilitando uma vez mais, a aplicação das cargas nos nós. Será considerada a área afectada por esta carga à semelhança do que é realizado para acção do vento na estrutura, secção 4.8.2.

Será necessário dividir a carga gerada pelo peso das chapas em duas cargas distintas, sendo a carga lateral ($F_{chapas\ laterais}$) e a carga superior|inferior ($F_{chapas\ sup|inf}$), uma vez que cada nó será afectado pelas duas que têm cargas diferentes. A carga gerada lateral terá a área em função da distância das secções e da altura considerada para a estrutura enquanto a outra terá a área em função da distância das secções e da largura da estrutura considerada.

$$F_{chapas} = F_{chapas\ laterais} + F_{chapas\ sup|inf}$$

, em que:

$$\Rightarrow F_{chapas\ laterais} = Q_{chapa} * dist * \frac{altura}{2}$$

$$\Rightarrow F_{chapas\ sup|inf} = Q_{chapa} * dist * \frac{largura_{inf}}{2}$$

Sendo Q_{chapa} definida por uma pressão (N/m²).

Com as cargas já definidas é possível gerar a sequência pretendida, aplicando em cada ponto/nó a carga necessária para se poder avaliar a estrutura.

A adição da carga representativa do peso dos funcionários na estrutura, numa possível necessidade de manutenção, é também de algum relevo. A aplicação desta vai ser simplificada e dividida pelos dois pontos numa zona de meio vão, isto é, metade da carga irá ser adicionada a F_A e a outra a F_B nessa zona. O valor total considerado é de 3 vezes o valor de peso atribuído para os funcionários, representando a presença de dois funcionários com o devido equipamento, correspondendo aproximadamente a 3000 N, numa zona a meio vão, a zona mais sensível do ponto de vista da resistência da estrutura.

4.8.2 Acção do Vento

Nos casos de estudos apresentados é considerada a aplicação de cargas provenientes da acção do vento sobre as estruturas. A sua implementação é possível de várias formas, sendo os métodos escolhidos diferentes nos casos pretendidos. No caso da estrutura treliçada vamos


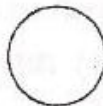
considerar que esta se concentra nos nós de ligação das barras numa lateral da estrutura, onde terá a intensidade da carga multiplicada pela área afectada. No caso da estrutura tubular esta irá ser aplicada em vários nós resultantes da malha construída no modelo Ansys pelo que cada conjunto de nós terá uma carga com uma intensidade, dependendo da área considerada.

Segundo a teoria (“Escoamento ao redor de corpos imersos” [12]) é possível encontrar a área a considerar para a aplicação das cargas. Da definição retira-se que a área característica aplicada aos casos é a área frontal, englobando “ o corpo visto da corrente, adequada para corpos espessos e rombudos, tais como esferas, cilindros, carros, mísseis, projecteis e torpedos.”.

Tirando partido desta informação consideraremos então que a área característica da secção treliçada será a área lateral da mesma, pelo que as cargas seriam aplicadas sobre a superfície revestida com placas de isolamento. A área, assim, é definida pelo comprimento e altura de cada estrutura. Por sua vez a estrutura tubular encontra-se no item da área projectada observado do ponto de vista da orientação do fluido, o ar. O valor para esta área será encontrado através da multiplicação do dobro do raio (diâmetro) pelo comprimento total.

Do ponto de vista do escoamento é indispensável, também, ter a noção que estas estruturas contêm geometrias que criam uma resistência à livre passagem do fluido (ar) por elas, mesmo com a consideração de que o escoamento do fluido é laminar e constante. É necessário aplicar um factor de correcção, que nos estudos de Mecânica dos fluidos é evocado como Coeficiente de Arrasto. De acordo com a disciplina de fluidos é possível encontrar tabelas que contêm os coeficientes característicos para algumas disposições geométricas [12], conforme o excerto apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Excertos da tabela 7.2 [12] sobre arrasto em corpos tridimensionais

Forma	C_A baseado na área frontal		
Cilindro quadrado: → 	2,1	Cilindro elíptico: 1:1 → 	<u>Laminar</u> 1,2

Nas normas encontradas (EUROCÓDIGOS) deparamos com o Eurocódigo I [11] que inclui as normas aplicadas a “acções aplicadas a estruturas”. Este por sua vez encontra-se dividido por partes, contendo 4 no seu todo. Na primeira parte encontra-se o pretendido, as acções do vento. De acordo com este documento consegue-se retirar a pressão dinâmica de referência de acordo com a zona em que se irá inserir o projecto. Da necessidade de especificar esta, considerou-se que se encontrava numa: zona costeira exposta aos ventos de mar, lagos extensos (Zona I). Tirando das especificações iniciais, a estrutura irá ser aplicada a uma altura média de 20 metros acima da superfície, o que corresponderá à presença de ventos de 37 m/s, aproximadamente (Fig. 4.27).

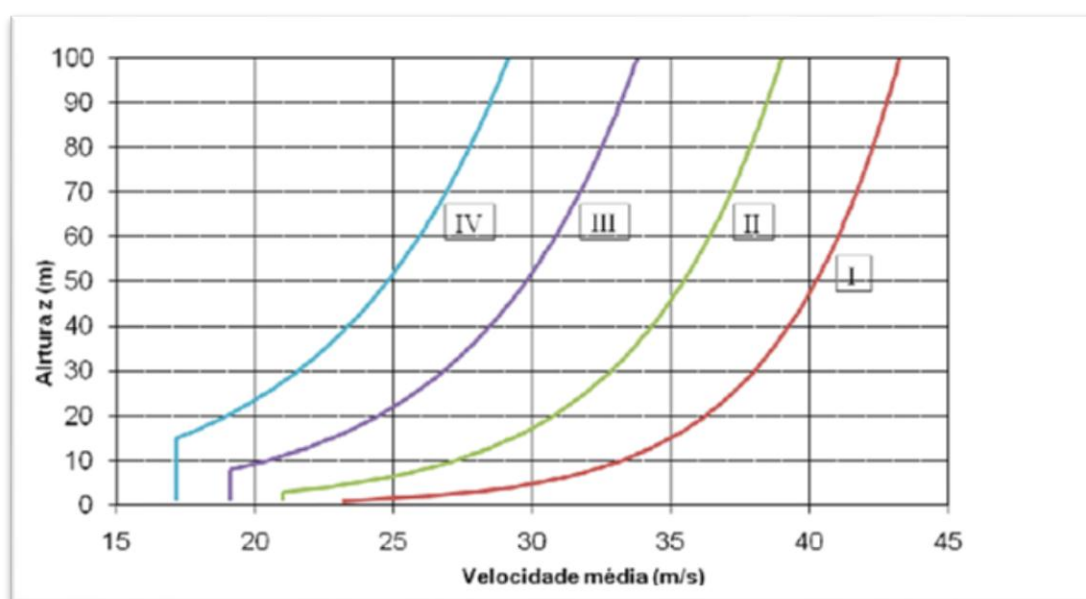


Fig. 4.27-Velocidade média do vento em função da altura [11].

Segundo o gráfico fornecido para esta estrutura, mas alusivo à pressão dinâmica de referência, irá estar a uma pressão de pico de $1,6 \text{ kN/m}^2$, majorando o seu valor (Fig. 4.28).

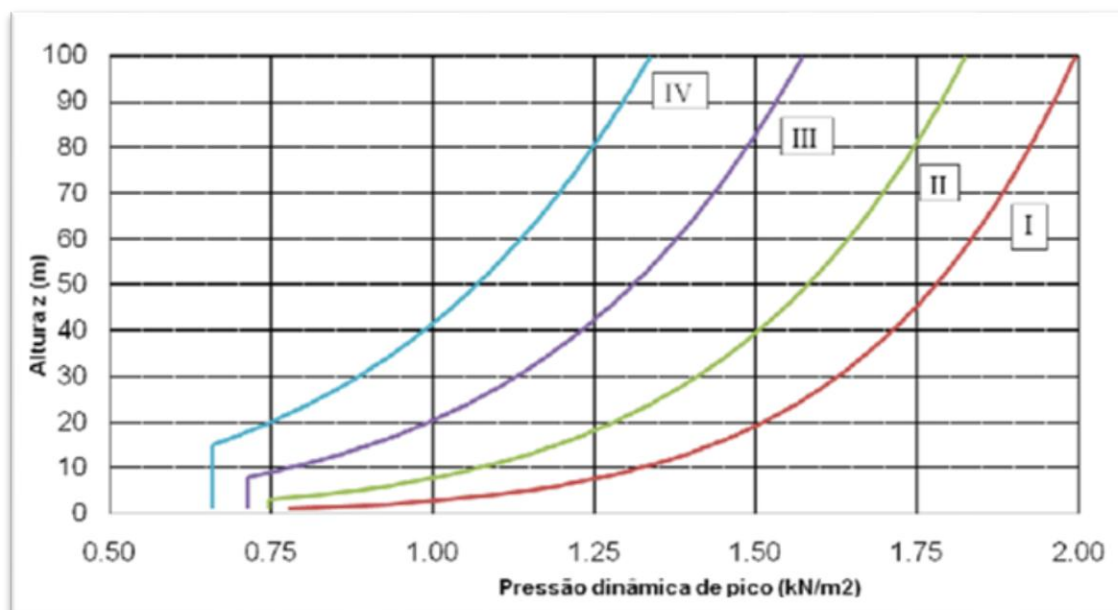


Fig. 4.28-Pressão dinâmica de pico [11].

Para a estrutura treliçada, seguindo a teoria das treliças e sabendo que a estrutura se encontra revestida por chapas lacadas é necessária ter em conta a área afectada pelo efeito das cargas da acção do vento. A carga devida à acção do vento que é aplicada em cada nó corresponde à resultante da pressão exercida sobre a área adjacente a esse nós conforme se mostra na Fig. 4.29.

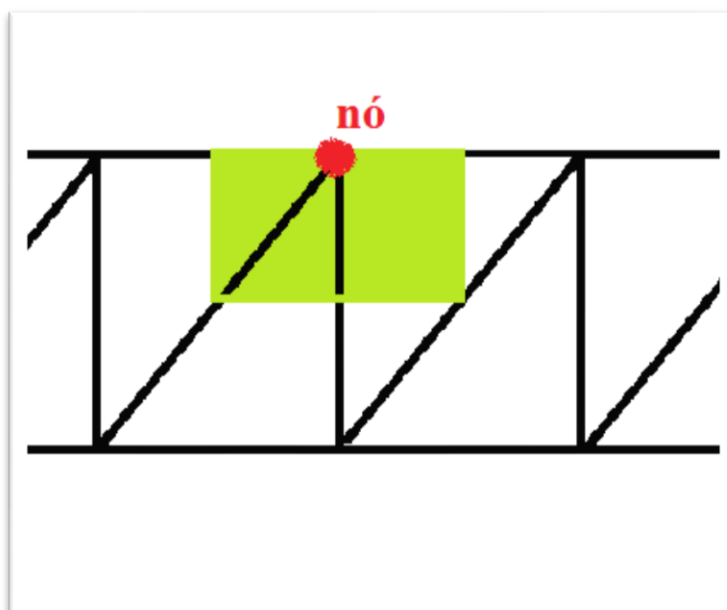


Fig. 4.29-Exemplo da área afectada pela carga do vento em cada nó.

Na figura apresentada é possível observar que o nó assinalado sofre acção das cargas impostas, pelo vento na superfície de revestimento, representada pela área a verde. Com esta imposição aproxima-se a aplicação da carga vinda do vento na estrutura em cada nó. A força aplicada a cada nó é descrita pela carga dinâmica de pico retirada do Eurocódigo I, pela área envolvida e pelo coeficiente de arrasto correspondente à estrutura, ficando da seguinte equação:

$$F_{nó} = C_A * Q_V * A \text{ , sendo } A = dist * \frac{altura}{2}$$

Para a geometria cilíndrica é essencial aplicar estas cargas ao longo de toda a superfície curva, necessitando que existam nós segundo a mesma, com isto, surge a necessidade de analisar o método construtivo adoptado pela falta de encontrar relações entre as áreas de apoio e as suas vizinhas (Fig. 4.30). Com o intuito de aplicar as cargas segundo a área projectada do cilindro foi decidido encontrar um factor de correcção associado ao comprimento e às zonas, visto que estas contêm mais ou menos nós dependendo da sua dimensão.

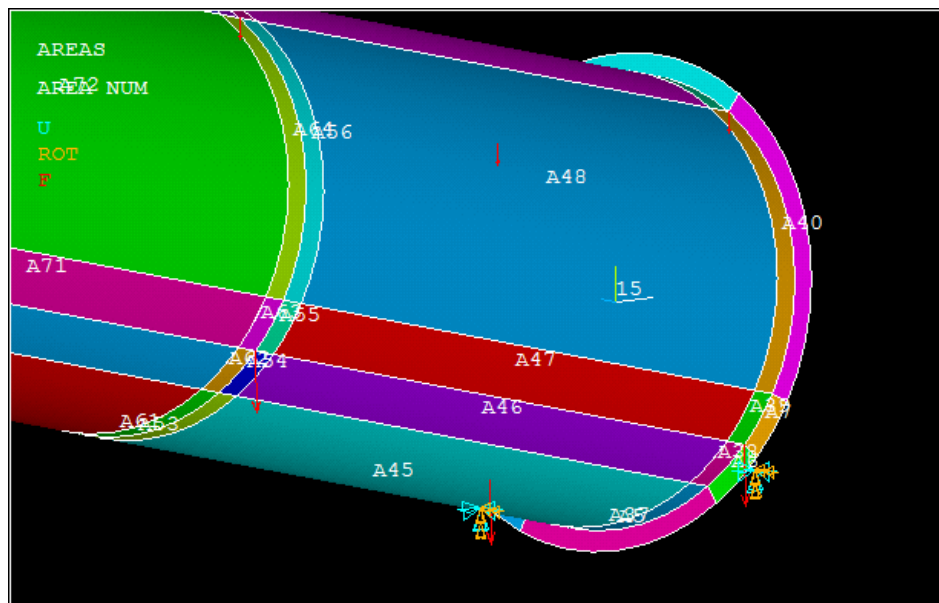


Fig. 4.30-Áreas definidas.

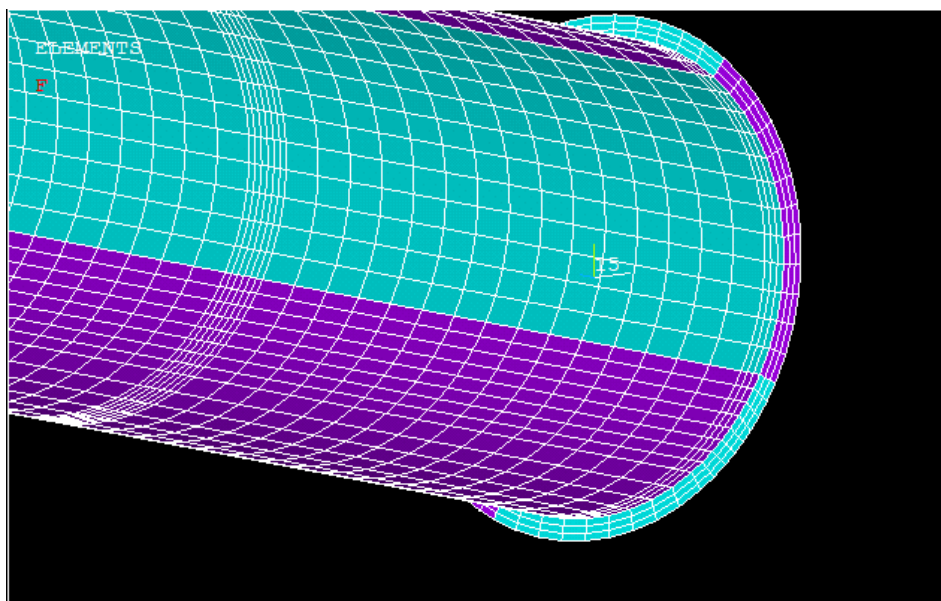


Fig. 4.31-Refinação automática das áreas geradas.

Pela Fig. 4.31 pode-se observar que existe uma grande concentração de nós nas zonas de reforço dos apoios, deixando-nos com a necessidade de corrigir este facto com um factor de correcção. O factor é conseguido, admitindo que as áreas curvas são as projectadas no plano vertical, para o caso da aplicação das cargas. Com essa relação da área total (A_t) pela área dos apoios (A_r) considerada e pela quantidade de nós nelas inseridas é conseguido o referido factor.

4.8.3 Códigos da aplicação das cargas

Com as cargas já caracterizadas e com o seu modo de aplicação definido é importante a transferência destas ideias para código que reflecta as opções tomadas.

De acordo com as numerações definidas para o primeiro anel quadrado (estrutura treliçada) ou circular (estrutura tubular). Para o modelo considerado para a estrutura treliçada (Fig. 4.32) as cargas são aplicadas directamente nos nós de construção do modelo, como já havia sido referido, não estando representadas as cargas geradas pelo peso das chapas de revestimento da estrutura. Na estrutura tubular (Fig. 4.33), as cargas são impostas aos pontos de construção do modelo e a carga do vento (FV_i , da figura) é aplicada a cada nó após a refinação das áreas e de acordo com a dimensão de cada área onde o ponto se insere (estando na área do reforço ou na restante, numa face do cilindro).

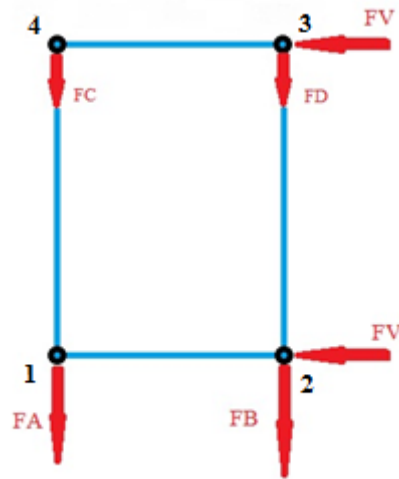


Fig. 4.32- Modelo de aplicação das cargas na estrutura treliçada.

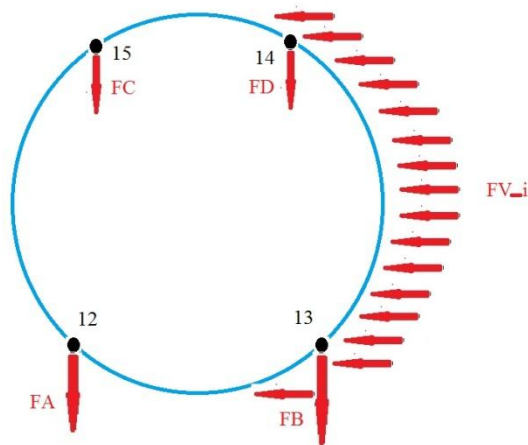


Fig. 4.33- Modelo de aplicação das cargas na estrutura tubular.

Nas seguintes figuras, Fig. 4.34 e Fig. 4.35, é apresentado o código gerado que representa as condições acima referidas.


```

C_a=2 ! coeficiente de arrasto do "paralelepipedo" -> 2
*DO, I, 1, n+1

    F, 1+(I-1)*4, FY, -FA-F_chapas
    F, 2+(I-1)*4, FY, -FB-F_chapas
    F, 3+(I-1)*4, FY, -FD-F_chapas
    F, 4+(I-1)*4, FY, -FC-F_chapas
    F, 2+(I-1)*4, FX, -C_a*FV
    F, 3+(I-1)*4, FX, -C_a*FV

*ENDDO

F, 5+(K-1)*4+2*k*4, FY, -3*(Fo/2)-FA-F_chapas
F, 6+(K-1)*4+2*k*4, FY, -3*(Fo/2)-FB-F_chapas

```

Fig. 4.34-Código de aplicação das cargas na estrutura treliçada.

O comando “F” permite associar uma força a um dado nó, com uma dada orientação, no caso FX (força segundo o eixo x) ou FY (força segundo o eixo y), com uma dada intensidade. Ao sobrepormos informação sobre um nó este só vai assumir a última “ordem”, tendo assim a carga a intensidade do último comando dado.

```

!!!!!! APLICAR CARREGAMENTOS NA ESTRUTURA !!!!!!

    FK, 12, FY, -FB
    FK, 13, FY, -FA
    FK, 14, FY, -FC
    FK, 15, FY, -FD

*DO, U, 2, N+1
    FK, 12+14+8*(U-1), FY, -FB
    FK, 13+14+8*(U-1), FY, -FA
    FK, 14+14+8*(U-1), FY, -FC
    FK, 15+14+8*(U-1), FY, -FD

*ENDDO

```

Fig. 4.35-Código de aplicação das cargas na estrutura tubular.

À semelhança do comando “F” o comando “FK” atribui a um dado ponto (keypoint) a força pretendida com as mesmas características.

Do plano criado para se aplicar as cargas criadas pela acção do vento sobre a estrutura tubular, surge parte do código de programação da aplicação na estrutura (Fig. 4.36).

```

C_a=1.2 ! Coeficiente de arrasto da geometria
Q_v=C_a*1600 ! N/m^2
NSEL,S,LOC,Y,-90,-teta-dr-0.001
NSEL,A,LOC,Y,-teta+dr+0.001,90
NSEL,R,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Z,0,dz ! dz é a espessura do reforço (metade)

*afun,deg ! Degree units for trig. functions
*GET,NUM_NODES_1,NODE,0,COUNT
A_t_1=2*R*dz

A_r_1=-(R*sin(-teta-dr)-R*sin(-teta+dr))*dz

!FV_1=Q_v*((A_t-A_r)/A_t)
FV_1=Q_v*(A_t_1-A_r_1)
F,ALL,FX,-FV_1/NUM_NODES_1

```

Fig. 4.36- Código de aplicação das cargas geradas pelo vento segundo as áreas consideradas (zona de reforço intermedia na estrutura considerada).

Com a indicação da área afectada, através de cálculos de trigonometria é possível encontrar as dimensões das áreas pretendidas e efectuar a contagem de todos os nós nelas contidas através do comando “NSEL”, sabendo os ângulos considerados na construção do modelo. Através da relação entre as áreas e do conhecimento da carga sobre a estrutura é aplicada “FV_1”, no caso. O valor de correcção da selecção de nós (+/-0.001) é necessário para que não haja a sobre contagem de nós em cada área.

5 Optimização de estruturas

5.1 Optimização de estrutura com Algoritmos Genéticos – Estrutura treliçada

Como é sabido, o Matlab é uma ferramenta muito poderosa, que permite a rápida resolução de cálculos complexos num curto espaço de tempo. Aplicado ao caso de estudo é possível enquadrá-lo com as necessidades de obter, tratar e voltar a efectuar respostas das variáveis pretendidas através dos algoritmos genéticos.

Dentro do programa Matlab está contida uma rotina que permite avaliar toda a estrutura pretendida, com os esforços aplicados e todos os requisitos necessários para que seja possível a actuação da ferramenta do Matlab, o Gatool.

Foi escolhido construir dentro deste as tabelas que contêm todas as variáveis necessárias à introdução no Ansys do problema a estudar. A avaliação por este método foi apenas proposta para a estrutura treliçada uma vez que a estrutura tubular remete para um maior cuidado na análise por ser indispensável alterar as medidas propostas à partida para alguns componentes, como o caso da largura do anel de reforço na zona dos apoios de forma a minimizar a introdução de materiais, mesmo que a sua influência não seja da maior relevância para os resultados deste estudo.

5.1.1 Analise através do GATOOOL

Esta ferramenta fornecida pelo MATLAB é muito potente, uma vez que permite ao utilizador encontrar a resposta que muitas vezes se procura de uma maneira fácil, rápida e fiável. A optimização discreta é efectuada através do algoritmo genético contido na ferramenta *GATOOOL* do *MATLAB* com a base na rotina exemplificada na Fig. 5.1.

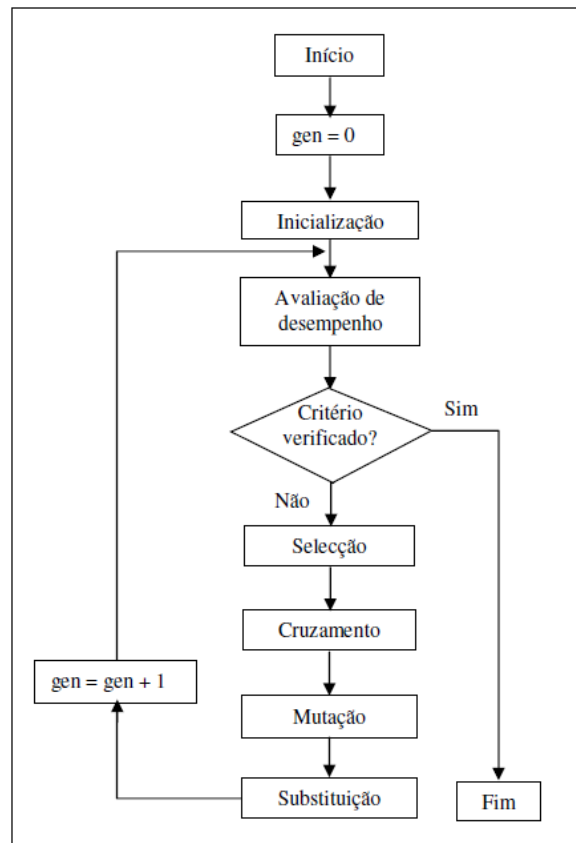


Fig. 5.1- Algoritmo genético simples [15].

O processo designado por Optimização com algoritmos genéticos baseia-se na teoria da evolução de Darwin [16]. Mas este processo não ocorre sem a possibilidade de ocorrência de falhas, ao que se dá o nome de mutação. A mutação é o fruto da geração de genes não existente nos pais de um certo individuo. Agora esta pode ser prejudicial ou benéfica, dando qualidades especiais a um individuo.

Dentro da análise corrida por elementos genéticos existem operadores genéticos designados por selecção, cruzamento e mutação (Fig. 5.2).

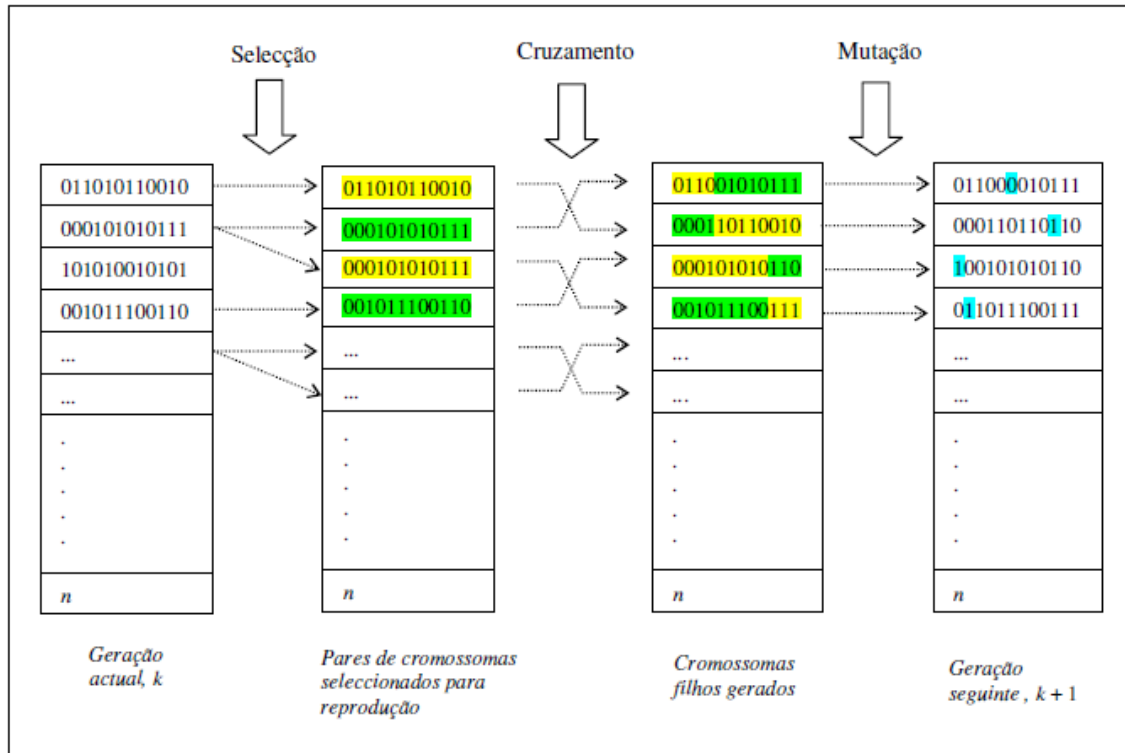


Fig. 5.2- Aplicação dos operadores genéticos na AG simples [15].

5.1.2 Adaptação do Algoritmo ao problema

Dentro do software Matlab foi desenvolvido uma rotina que permite contribuir para a selecção de barras a introduzir no modelo criado em Ansys e retirar os valores da sua análise e trata-los devidamente (ANEXO V).

Dentro do programa está-se a considerar que cada tipo de barra será codificada por um segmento de 4 bits, formando um cromossoma com a junção de todos os segmentos considerados. Através de codificação binária (usada no caso, 0's e 1's) é possível a construção de tabelas que contêm 16 perfis diferentes e atribui uma série de 4 bits para cada perfil, levando a um número de bit's por cromossoma equivalente ao número de bit's por segmento a multiplicar pelo número de segmentos do cromossoma. Na tabela seguinte é possível ter uma ideia da codificação referida.

Tabela 5.1- Tabela de conversão para código binário e referência a um tipo de barra tubular quadrada (exemplo).

Código Decimal	Código Binário	Tubo quadrado (dimensão X espessura)
0	0000	25X4
1	0001	30X4
2	0010	35X4
3	0011	40X4
4	0100	45X4
5	0101	50X4
6	0110	60X4
7	0111	70X4
8	1000	80X4
9	1001	90X4
10	1010	100X4
11	1011	120X4
12	1100	140X4
13	1101	150X4
14	1110	150X4
15	1111	150X4

De acordo com o que foi desenvolvido nos programas, a estrutura treliçada será composta por 4 tipos diferentes de barras, logo 4 segmentos distintos, formando um cromossoma com 16 bit's. Cada segmento vai compreender o código binário correspondente à barra seleccionada para a avaliação da estrutura através do recurso ao software Ansys.

Dentro dos requisitos do software está a necessidade de introduzir a dimensão da população a estudar, esta compreende-se entre o número de bit's e o dobro desse número, o tipo de função adoptada para reproduzir valores, o tipo de selecção adoptado ou até o tipo de mutação.

Com a noção das transformações que ocorrem na selecção dos perfis dados nas tabelas e com as características intervenientes neste estudo consideradas relevantes para a avaliação das mesmas, é executável a avaliação recorrendo ao programa Ansys para obter as tensões resultantes na estrutura como já havia sido referido.

Esta otimização é auxiliada pelo cálculo das tensões através do *ANSYS BATCH MODE* (Ansys) pelo que é necessário colocar os ficheiros utilizados em concordância relativamente à sua localização, isto é, os ficheiros que contêm a programação para a avaliação da estrutura treliçada têm de estar dentro da mesma directoria, no caso, os ficheiros que contêm os anexos IV e V.

Uma vez que não se trata de uma otimização não constrangida (otimização através de algoritmos genéticos) é necessário introduzir uma penalização para que se consiga correr o processo. Neste tipo de análise nunca é muito fácil entender quais os melhores valores das constantes de penalização a aplicar, visto que estamos presente um processo iterativo que nos leva sempre a valores muito próximos uns dos outros, mas dificilmente iguais. Com a alteração destes é possível estarmos mais perto do resultado que poderia ser previsto através de muitos cálculos morosos e de muitas considerações tomadas durante o cálculo manual.

Através das restrições impostas (tensão máxima admissível e deslocamentos máximos (verticais e horizontais)) é possível obter os resultados possíveis respeitando todos os requisitos funcionais e estruturais pretendidos.

5.1.3 Dados de entrada para a estrutura treliçada

No modelo da estrutura treliçada é necessário introduzir as constantes materiais (Densidade, Modulo de Elasticidade e Coeficiente de Poison) e os seguintes parâmetros:

- A distância total da estrutura (100 metros),
- As cargas admitidas na estrutura (Q_{ad} , Q_c , Q_q , Q_t , Q_o , Q_v , Q_{chapas}),
- O numero de apoios (está optimizado para 4, mas pode adoptar outro valor),
- Tabelas com as características dos perfis de escolha, pelo método dos algoritmos genéticos em combinação com o software Ansys,
- A largura das estações a considerar (0.890 ou 1.940 m),
- A altura da estrutura ao solo,
- O número de troços da estrutura,
- Os constrangimentos ao nível dos deslocamentos e resistência possíveis para a estrutura.

Na obtenção do custo para esta estrutura é necessário definir os seguintes termos, necessário para introduzir na programação desenvolvida (Anexo VII):

- O comprimento da estrutura a considerar (100 metros),
- O número de troços da estrutura,

- A largura das estações a considerar (0.890 ou 1.940 m),
- A altura da estrutura (dimensão desde a parte inferior e a superior da treliça, 2,5 metros),
- As características das vigas seleccionadas para a melhor solução encontrada,
- O factor de marcha associado ao método de soldadura,
- Os factores de correcção dos custos (f_{mat} , f_{sold} , f_{corte} , f_{prep} e f_{pint}).

5.2 Optimização da estrutura tubular

Na estrutura tubular procura-se a melhor solução que permitirá escolher a menor espessura para a chapa que compõe a superfície do “tubo” total. Esta dimensão não depende da selecção de outras para se encontrar a mesma, ao contrário da estrutura treliçada que necessita de se conhecer um grande número de barras, apesar de se estarem a considerar apenas 4 perfis diferentes. Existem locais que foram reforçados preventivamente, mas que não irão ser determinantes para o resultado da avaliação estrutural. Através da análise realizada com o auxílio do software Ansys é possível obter uma resposta segura e rápida para as tensões em vários pontos da estrutura.

5.2.1 Dados de entrada para a estrutura tubular

Para se conseguir obter a optimização da estrutura tubular é necessário colocar as propriedades do material (Densidade, Modulo de Elasticidade e Coeficiente de Poison) e os seguintes parâmetros:

- A distância total da estrutura (100 metros),
- As cargas admitidas na estrutura (Q_{ad} , Q_c , Q_q , Q_t , Q_{op} , Q_v),
- O numero de apoios (está optimizado para 4, mas pode adoptar outro valor),
- A espessura da chapa principal (varia de acordo com o resultado final, é a nossa variável),
- A largura das estações a considerar (890 ou 1940 mm),
- A altura da estrutura ao solo,
- O número de troços da estrutura (equivalente ao número de vigas internas menos uma),
- O número de anéis de reforço considerados,

- Os constrangimentos ao nível dos deslocamentos e resistência possíveis para a estrutura.

No caso da obtenção do custo da estrutura tubular é necessário introduzir no Matlab da programação realizada (Anexo VIII) os seguintes termos:

- O comprimento da estrutura a considerar (100 metros no caso apresentado),
- A espessura da chapa principal (varia de acordo com o resultado final, é a nossa variável),
- A largura das estações (890 ou 1940 mm),
- O número de troços considerado,
- As dimensões das chapas iniciais antes da calandragem,
- A dimensão da chapa para os anéis de reforço,
- As características das vigas internas consideradas,
- O número de passos de soldadura por cada perímetro considerado,
- O custo das vigas internas,
- O custo da chapa,
- O custo do processo de calandragem
- A densidade do aço,
- O custo da pintura
- Os factores de correcção dos custos (f_{mat} , f_{sold} , f_{caland} , f_{corte} , f_{prep} e f_{pint}).

5.3 Constrangimentos da avaliação

5.3.1 Constrangimentos dimensionais

Para se conseguir obter resultados é necessário impor limites de tensão e de deslocamentos. Para os pontos que representam a ligação das estruturas com os pés de apoio é necessário colocar restrições ao nível dos deslocamentos representado a rigidez imposta pelas estruturas dos pés de apoio.

Para o caso das tensões nas barras, estas chegam a um limite quando atingem um valor superior ao permitido. Isto leva que se encontrem as barras mais adequadas aos esforços presentes com as tensões mais perto do limite de tensão admitido.

Os limites de tensão de cedência (no caso) dos materiais irão servir para se encontrar a solução do problema em conjunto com a admissão de um coeficiente de segurança que esteja adaptado aos requisitos.

No que se refere aos constrangimentos impostos pelos deslocamentos da estrutura as normas nacionais (EUROCODIGOS) contêm informação importante neste caso, fornecendo os limites praticados para vários requisitos de utilização. As normas que se referem aos casos abordados estão presentes no Eurocódigo III [6].

No Eurocódigo III encontram-se disponíveis tabelas informativas referentes aos deslocamentos verticais (Tabela 5.2) e iremos também assumir que o valor praticado para os deslocamentos horizontais se encontram associados aos mesmos valores.

Tabela 5.2 -Valores recomendados para os limites dos deslocamentos verticais [6]:

Quadro NA.1 – Valores recomendados para os limites dos deslocamentos verticais		
Condições	Limites (ver figura NA.1)	
	d_{max}	d_2
Coberturas em geral	L/200	L/250
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas, para além do pessoal de manutenção	L/250	L/300
Pavimentos em geral	L/250	L/300
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos ou outros acabamentos frágeis ou divisórias não flexíveis	L/250	L/350
Pavimentos que suportem pilares (a não ser que o deslocamento tenha sido incluído na análise global para o estado limite último)	L/400	L/500
Quando d_{max} possa afectar o aspecto do edifício	L/250	-
NOTA: No caso geral, L representa o vão da viga. No caso de vigas em consola, L representa duas vezes o vão real da consola.		

Dentro das hipóteses apresentadas consideraremos que as estruturas em questão se enquadrarão nas condições (Pavimentos em geral), permitindo um valor máximo dos seus deslocamentos de L/250, representando o vão sobre 250 (133,2 mm).

5.3.2 Constrangimentos dos materiais

Em todos os casos de estudo de um objecto/estrutura, existe a necessidade de que estes estejam segundo as limitações dos materiais utilizados. Segundo o estudo efectuado o material a usar é o aço, de onde se consegue retirar os valores presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Características do material escolhido para as estruturas.

	Material	Tensão limite de cedência, σ_{ced} (MPa)	Norma
Chapas	Aço: - Densidade: 7860 Kgf/m ³ - Módulo de Elasticidade: 210 MPa - Coeficiente de Poisson: 0,3	235	DIN 17100 (RSt 37.2)
Vigas / barras		355	EN 10025 (S355J2)

Com base nas características do aço e da tensão limite de cedência de cada elemento ainda é necessário adicionar um coeficiente de segurança (f.s) que permita assegurar que o projecto suporta plenamente os carregamentos impostos, no caso. Para o f.s é decidido que este tenha o valor de 2 relativamente às tensões de cedência, afastando assim a tensão máxima admissível da tensão de cedência do material, para se conseguir suportar factores existentes na realidade e que não foram considerados nos modelos estudados (simplificações efectuadas).

6 Custos

Actualmente, é fácil compreender a necessidade de se tentar optar, sempre que possível, pelos materiais mais baratos, mas que consigam assegurar o pretendido.

Foi necessário procurar várias empresas e vários fornecedores do ramo de forma a encontrar informação que permitisse ter uma noção do mercado de perfis e componentes existentes, considerados no estudo, e métodos utilizados na construção das estruturas.

Nos anexos (ANEXO I,II e III) é possível ter uma noção das mais variadas características presentes nos diversos componentes e serviços prestados.

Na escolha dos perfis, pelo que é possível ver nas imagens, tem de se ter em atenção a existência dos mesmos em relação à espessura e dimensão dos vários constituintes em cada fornecedor. Este cuidado é necessário, devido à existência de algumas medidas não normalizadas que levam o preço de uma viga, por exemplo, a ter um aumento significativo em relação a outra tenha as mesmas características pretendidas, uma vez que, no caso da estrutura treliçada, para o método dos nós apenas interessa a área da secção das barras.

Para a comparação dos custos de fabricação foi decidido retirar os custos de material envolvido na construção da estrutura do tapete transportador, bem como a estrutura e componentes dos sistemas de iluminação e de prevenção de incêndios, os custos associados aos corrimões e o custo das grelhas das passadeiras. Esta simplificação pode ser admitida devido a se estar a introduzir os mesmos custos nas duas soluções estudadas.

Cada estrutura tem características de fabrico algo diferenciadas, como as extensões a soldar. Um bom exemplo é a estrutura tubular, que permite à priori considerar a construção do cilindro oco por completo, isto é, em que todas as chapas que formam a superfície do mesmo são soldadas umas a seguir das outras, e que para se poderem transportar, são separadas por anéis de reforço, não considerados no estudo, para permitir depois uma mais simples e rápida conexão das mesmas, mas consideradas no processo de soldadura.

Os custos com soldadura são atribuídos através de uma experimentação realizada em meio industrial, na qual foi possível recolher que para realizar um cordão de solda de ângulo longitudinal [17] de 5x5 mm, aproximadamente, para um comprimento de 160 mm, sendo necessário gastar um eléctrodo de 250 mm e demorou 66 segundos a ser realizado não contando com o tempo de preparação e posterior limpeza do cordão de solda. Para o caso apresentado será melhor a aplicação do processo MAG (metal active gás) [18] em vez de soldadura através de SER (soldadura por eléctrodo revestido). A grande diferença observada está contida no tempo de soldadura de cada método para o mesmo objectivo. No caso do SER temos de ter em

conta o tempo de reposição do eléctrodo revestido, que tem dimensões reduzidas e o tempo de limpeza da escória, por sua vez o método MAG tem a capacidade de ter bobines de fio com um comprimento muito significativo enquanto a maior preocupação será a de mudar a bobine ou mudar as garrafas de CO₂ quando indispensável e não é necessário efectuar a limpeza da escória, pois esta não é formada por este método. O mesmo fica mais económico quando comparado com o anterior, tendo um resultado muito semelhante e não causando uma tão grande deformação nas zonas próximas do cordão de soldadura.

O tempo de preparação considerado parte de uma parte da experiencia de soldadura e corte executada e da admissão de tempo para se colocar as chapas laterais, no caso da secção treliçada. É de notar que o tempo admitido para as duas variantes (largura de correia) das estruturas é o mesmo, o que vai igualar os custos de preparação das mesmas. O mesmo foi deixado inalterado uma vez que o tempo na prática não seria assim muito afastado do que fora admitido.

Para a pintura e decapagem foram admitidos os seguintes parâmetros:

- Decapagem ao grau SA 2 ½.
- 75 microns de primário epoxi 17340 da Hempel
- 100 microns de intermédio 15560 da Hempel
- 80 microns de acabamento 55610 da Hempel em cor a definir.

Os dados apresentados foram considerados em contacto com empresas do ramo, da construção das estruturas em questão. O valo fornecido para o custo deste procedimento ronda os 20 €/m² para a estrutura treliçada e cerca de 2/3 deste valor para a estrutura tubular, devendo-se esta diferença ao rendimento conseguido no processo de pintura e decapagem de cada estrutura. Nos valores apresentados não se apresenta incorporada a taxa de IVA.

6.1 Custos secção Trelaçada

Estando a considerar que as dimensões das barras estão representadas apenas por linhas, os cálculos também estarão de acordo com esta linha de ideias e caso necessário será admitido um valor de correcção de comprimento (um coeficiente, f_{mat}) para que não exista a falta de material aquando a necessidade deste na construção que estará compreendido entre os valores de 1 e 1.1, visto que as dimensões das barras do projecto são grandes. Este valor explica a necessidade de cortar as vigas ou barras em ângulos que complementem as superfícies onde serão soldadas para que permitam a correcta união das mesmas, evitando assim a adição de mais materiais para a sua soldadura, admitindo que resultaria sempre de cada corte um excedente.

No processo de soldadura dos perfis será adoptado o perímetro das secções transversais dos perfis de cada secção das barras a soldar. Para uma barra soldada topo a topo não existem variações das medidas de secção, mas com as barras oblíquas e transversais o mesmo não se verifica, aumentando as dimensões a soldar. Através da determinação dos ângulos é conseguida a dimensão que é alterada. No caso, a dimensão alterada será a dimensão y das mesmas. Na adição de componentes à estrutura apenas se tem presente a colocação das chapas de isolamento da estrutura. Será admitido que cada chapa demora 15 minutos a colocar, isto devido à necessidade de dois homens para o efeito, demorando 7:30 minutos para executar o processo de colocar cada chapa devidamente.

Para a decapagem e pintura existe a necessidade de saber a área da superfície a tratar. O cálculo desta pode ser simplificado, de forma a se ter uma noção não muito distante da realidade através das dimensões principais dos tubos ou perfis admitidos nos problemas. Tendo por base o perímetro exterior aproximado, é aceitável considerar os valores resultantes como representativos da área multiplicando o valor do perímetro de secção considerado pelo comprimento total de cada tipo de barra ou perfil.

Sendo a estrutura treliçada composta por tubos de secção quadrada ou rectangular foi também decidido, por forma a simplificar os cálculos a realizar, a encontrar um valor por tipo de perfil, avaliando-se inicialmente se seria possível esta admissão, para o custo dos referidos materiais.

Retirando exemplos de tubos quadrados e encontrando o respectivo custo por unidade de comprimento (metro) [19] é possível desenvolver a Tabela 6.1:

Tabela 6.1-Custo do perfil quadrado por área de secção por metro¹.

Tubo de secção quadrada	Área de secção (cm²)	Custo (€/m)	Custo por área de secção
50x50x4	7,188	6,85	0.953
80x80x4	11,99	11,44	1,034
90x90x6	19,77	20,44	1,013
100x100x6	22,17	22,46	0,954
		Média	1,013

No caso da utilização de tubo rectangular:

¹ Os valores apresentados são referentes à pesquisa realizada a 06/03/2013, em <http://www.ruisantos-sa.com>.

Tabela 6.2-Custo do perfil rectangular por área de secção por metro².

Tubo de secção rectangular	Área de secção (cm ²)	Custo (€/m)	Custo por área de secção
60x40x4	7,188	7,510	1,045
80x40x4	8,788	8,860	1,0082
100x50x5	13,730	15,150	1,103
120x80x6	22,170	23,000	1,037
150x50x8	28,750	32,880	1,144
180x80x8	35,150	39,180	1,114
		Média	1,074

Os custos apresentados não têm contido a taxa de IVA praticada actualmente.

No caso das chapas lacadas que compõem o revestimento exterior, conseguiu-se obter o seu custo através do catálogo de venda de uma empresa de material de construção [20], apresentado na Fig. 6.1.

CHAPA CANELADA	
MEDIDAS (mt)	PREÇO (€ / unidade)
2 mt	10,300
2,5 mt	16,016
3 mt	23,060

Fig. 6.1-Tabela de custos para as chapas caneladas lacadas [20].

Para um ajuste final do cálculo é possível alterar, à semelhança do que foi referido para a quantidade de material (f_mat), os coeficientes de soldadura (f_sold), corte, preparação e o armar das estruturas (f_prep) e pintura (f_pint) permitindo um ajuste referente ao aproveitamento de cada acção referida.

Conforme o que foi referido anteriormente, foi desenvolvida uma tabela (Tabela 6.3) explicativa dos índices que se consideram relevantes para o cálculo dos custos (Anexo VII) envolvidos nesta estrutura.

² Os valores apresentados são referentes à pesquisa realizada a 06/03/2013, em <http://www.ruisantos-sa.com>.

Tabela 6.3-Tabela dos custos da estrutura treliçada.

	Parcelas de custo	Variáveis	Objectivo	Observações	Notas
Custo estrutura treliçada (C_trel)	Custo material	<ul style="list-style-type: none"> n_barras_i_maj (número de barras de 6m majorado) c_material_i (custo referência do material) 	<ul style="list-style-type: none"> C_mat_i (custo de cada tipo de perfil) 	<ul style="list-style-type: none"> Cada equação está relacionada com a geometria de cada barra i (comprimento de cada barra) 	<ul style="list-style-type: none"> É necessário ter em conta a diferença de ângulos presentes nas zonas de corte e soldadura As medidas dos ângulos vão depender do número de secções (n) Ceil () : arredonda o valor para o número inteiro superior O factor assumido é de $f_{mat} = f_{corte} = f_{sold} = 1.05$
		<ul style="list-style-type: none"> barra i: $C_{mat_i} = n_{barras_i_maj} * custo_{mat_i} * 6$ 		<ul style="list-style-type: none"> Existe a aproximação por excesso a um número inteiro de barras i (6 m) no modelo 	
		<ul style="list-style-type: none"> $C_{total_mat} = C_{mat_1} + C_{mat_2} + C_{mat_3} + C_{mat_4}$ 		<ul style="list-style-type: none"> Cálculo do custo de cada tipo de barra e sua posterior soma 	
	Custo corte	<ul style="list-style-type: none"> A_corte_i (área de corte representante da área total existente de corte na estrutura para o perfil i) C_corte (custo da operação de corte, experimental) C_corte_mat_i (custo de corte de cada perfil) 	<ul style="list-style-type: none"> C_corte_toital (custo de corte total) 	<ul style="list-style-type: none"> A área de corte é baseada na área planificada de cada barra considerada. A geometria do corte é de grande relevância para os perfis 3 e 4 .Cálculo do custo de corte com base em resultados experimentais 	
		<ul style="list-style-type: none"> Barra i: $C_{corte_mat_i} = A_{corte_mat_i} * C_{corte}$ 		<ul style="list-style-type: none"> O cálculo é efectuado tendo 	

		<ul style="list-style-type: none">C_corte_total = C_corte_amt_1 + C_corte_amt_2 + C_corte_amt_3 + C_corte_amt_4		em conta o número de cortes e a área estimada de corte total de cada tipo de barra	
	Custo soldadura	<ul style="list-style-type: none">P_total_mat_i (perímetro total de soldadura em cada perfil i)C_cord_sold (custo de cada cordão de soldadura por comprimento)	<ul style="list-style-type: none">C_sold_mat_i (custo do cordão de soldadura de cada perfil i)	<ul style="list-style-type: none">Custo do cordão de soldadura fundamentado com exercício experimental em oficinaO perímetro de cada tipo de barra é retirado através das dimensões exteriores de corte das barras escolhidasAtravés dos perímetros encontrados e com o número de intervenções estimado pode-se retirar o custo de soldadura a aplicar na estrutura	
		<ul style="list-style-type: none">Barra i: C_sold_mat_i = P_total_mat_i * C_cord_sold			
		<ul style="list-style-type: none">C_sold_total = C_sold_mat_1 + C_sold_mat_2 + C_sold_mat_3 + C_sold_mat_4			
Custo preparação	<ul style="list-style-type: none">T_prep_corte_sold_mats (tempo de preparação de soldadura e corte por cada barra)N_barras_total (numero de barras na estrutura)T_colocar_chapas (tempo de fixação das chapas de revestimento)C_prep (custo de mão-de-obra)	<ul style="list-style-type: none">C_prep_mat (custo da preparação envolvida para a estrutura)	<ul style="list-style-type: none">Os tempos apresentados são estimativas dos tempos que poderão representar o que se passa no meio industrial.	<ul style="list-style-type: none">(16+(n-1)*12)– número de barras existente na estrutura15 – 15 minutos por cada colocação de chapas lacadas na estrutura*60 - passa a segundos)*4 – consideração dos 4 lados da estrutura	

		<ul style="list-style-type: none">Barra i : $C_{prep_mat}=T_{prep_corte_sold_mats}*C_{prep}*2*(16+(n-1)*12)+C_{prep}*15*60*4*dist_total$			<ul style="list-style-type: none">O factor considerado é: $f_{prep}= 1.05$
Custo pintura	<ul style="list-style-type: none">A_pint_i (área de pintura de cada perfil i)	<ul style="list-style-type: none">C_pint_i (custo de pintura e decapagem por unidade de área)		<ul style="list-style-type: none">As dimensões que representam a área de pintura são as dimensões exteriores das barras consideradas.Com a superfície total na estrutura de cada tipo de barra é possível determinar um custo aproximado para o processo de decapagem e pintura	<ul style="list-style-type: none">A pintura considerada contem uma protecção anti-corrosiva.O factor estimado para esta estrutura será de $f_{pint}=1$.O custo de pintura já contem, o custo de decapagem e pintura.
	<ul style="list-style-type: none">Barra i: $C_{pint_i} = A_{pint_i} * C_{pintura}$				
	<ul style="list-style-type: none">$C_{total_pint} = C_{pint_1} + C_{pint_2} + C_{pint_3} + C_{pint_4}$				
Custo chapas lacadas	<ul style="list-style-type: none">largura_estacoes (largura das estações)Altura (altura da estrutura)C_chapas_laterais (custo das chapas laterais)C_chapas_sup (custo das chapas superiores e inferiores)	<ul style="list-style-type: none">C_chapas (Custo das chapas)		<ul style="list-style-type: none">As chapas laterais têm a mesma dimensão em ambas as situações abordadasSeleccção das chapas superiores e inferiores a colocar dependendo da largura da estruturaCálculo do custo envolvido	<ul style="list-style-type: none">Cada chapa é normalmente definida pela sua altura e por 1 metro de largura, isto não contando com a dimensão de sobreposição das chapas finais do conjunto formado em cada face da estrutura
	<ul style="list-style-type: none">Chapas laterais: $C_{chpas_laterais} = 16$Chapas superiores / inferiores: $C_{chapas_sup} = 10.3$ (largura de estações de 0.890 m) $C_{chapas_sup} = 23$ (largura de estações de 1.940 m)				
	<ul style="list-style-type: none">$C_{chapas} = 2 * C_{chapas_laterais} * dist_total + 2 * C_{chapas_sup} * dist_total$				

Com os parâmetros intervenientes na função custo, é agora possível apresentar a mesma:

$f(C_{\text{tre1}}) = f(\text{dist_total}, \text{altura}, \text{largura_estacoes}, n, \text{dim_x_i}, \text{dim_y_i}, \text{dim_esp_i}, \text{Area_seccao_i}, C_{\text{chapas_laterais}}, C_{\text{chapas_sup}}, R_{\text{mat_i}}, f_{\text{mat}}, f_{\text{sold}}, f_{\text{corte}}, f_{\text{prep}}, f_{\text{pint}})$, com $i = \{1, 2, 3, 4\}$.

É de notar que foi tomada a decisão de colocar um incremento ($f_{\text{mat}} = f_{\text{corte}} = f_{\text{sold}} = f_{\text{prep}} = 1.05$) em algumas acções a desenvolver na actividade de construção, sendo justificadas pela necessidade de mais material para se efectuar o reforço da estrutura apenas para a situação de divisão desta em módulos, dependendo da sensibilidade da avaliação dos custos de cada empresa.

6.2 Custos secção Tubular

Na presente estrutura serão também considerados os coeficientes apresentados anteriormente, devido à existência de vigas recortadas no interior e exterior do tubo formado pelas chapas e pelas necessidades extra que existem normalmente numa operação de construção de uma estrutura com as dimensões tratadas. Relativamente às chapas é considerada a sua união num todo, isto é, para se formar o tubo completo será considerada a sua formação com chapas com uma largura de 2000 mm, o que irá facilitar a união para se poder dividir em módulos, sendo assim necessário introduzir os arcos de ligação das estruturas de modo as estas poderem ser deslocadas para os locais de destino. Do seguimento desta imposição retiramos que existirão 3 zonas em que é necessário considerar a soldadura dos arcos de ligação, sendo necessários 6 perímetros do círculo formado pelas chapas. Os perímetros ficam assim dependentes do raio considerado, visto que serão analisadas duas medidas para as estruturas.

Na secção tubular temos de entrar em conta com o processo de calandragem. Os custos considerados associam-se ao tempo necessário para a sua realização e à utilização da máquina necessária (calandra). O tempo por sua vez depende da espessura, pelo que pode levar menos operações ou mais, dependendo se é mais reduzida ou mais elevada a sua espessura, respectivamente. O custo horário está de acordo com o praticado para outra acção de fabrico, de 25 €/hora e o custo encontrado que representa a calandragem é de 0,5 €/Kg [21].

No custo das chapas laminadas (Tabela 6.4) depara-se com os preços encontram-se separados por intervalos de espessura. Admitindo que apenas se irá colocar chapas com largura de 2 metros encontra-se para chapas com uma espessura entre 3 a 25 mm o custo de 0,818 €/Kg. O peso das chapas é conseguido através da densidade do aço (Kg/m^3) e a determinação da quantidade de aço contido nelas (m^3).

Tabela 6.4- Tabela de preços de chapa preta laminada a quente, qualidade RSt 37.2 [20]:

CHAPA PRETA (Laminada a Quente Qualidade RST 37.2)						
MEDIDAS (mm)	DIMENSÃO (mt) e PREÇO P/ (€/kg)					
	2X1	2,5X1,25	3X1,5	6X1,5	Larg.= 2mt	Larg.> 2mt
1,5	0,810	0,810	0,820			
2	0,790	0,790	0,800			
2,5	0,760	0,760	0,760			
3	0,760	0,760	0,760	0,760	0,818	
4 a 7	0,760	0,760	0,760	0,760	0,818	
8 a 12	0,760	0,760	0,760	0,760	0,818	0,838
14 a 25	0,820	0,818	0,818	0,818	0,818	0,838
30 a 40	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838
50 a 100	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838	0,838

No caso das vigas internas da estrutura considera-se que são do tipo IPE100, sendo as mais leves comparadas com outras do mesmo tipo de fabrico. O preço destas está referente ao peso de cada uma tendo um custo de 0,792€/Kg (Tabela 6.5).

Tabela 6.5-Tabela de preços de vigas HEB, HEA e IPE [20].

FERROS HEB / HEA e IPE						
MEDIDAS (mm)	FERRO HEB		FERRO HEA		FERRO IPE	
	kg / 6mt comp.	Preço/€ Kg	kg / 6mt comp.	Preço/€ Kg	kg / 6mt comp.	Preço/€ Kg
100	123	0,833	100	0,833	49	0,792
120	161	0,833	120	0,833	63	0,792
140	203	0,833	148	0,833	78	0,792
160	256	0,833	182	0,833	95	0,792
180	308	0,833	213	0,833	113	0,802
200	368	0,837	254	0,837	135	0,802
220	430	0,837	303	0,837	158	0,802
240	500	0,855	362	0,855	185	0,816
260	558	0,855	409	0,855		
270					217	0,816

À semelhança do que foi referido para a obtenção dos custos na estrutura treliçada foi desenvolvido um código para o cálculo aproximado dos custos envolvidos na estrutura tubular (Anexo VIII), estando presente um resumo na Tabela 6.6.

Tabela 6.6-Tabela dos custos envolvidas na estrutura tubular.

	Parcelas de custo	Variáveis	Objectivo	Observações	Notas
Custo estrutura tubular (C_{tub})	Custo Calandragem	<ul style="list-style-type: none"> N_chapa_calandrada_1 – número de chapas a calandrar Esp – espessura das chapas (m) Area_chapa_1 – Área das chapas 1 (m²) D_aco – Densidade do aço (kgf/m³) C_processo_calandragem – Custo do processo de calandragem (€/kg) 	<ul style="list-style-type: none"> C_calandragem – Custo de calandragem das chapas (€) 	<ul style="list-style-type: none"> No processo de calandragem já está a considerar o tempo de preparação e corte para esta acção 	<ul style="list-style-type: none"> No custo é considerado o material excedente para a execução de algumas tarefas, como o comprimento das chapas para o processo de calandragem em que existe sempre um excedente no início e no fim das chapas Apenas está a ser considerado a adição de um cordão de solda do lado externo e interno do tubo O factor assumido é de f_{mat}= f_{sold} =1
		<ul style="list-style-type: none"> Caland_chapa_1 = esp * n_chapa_calandrada_1 * Area_chapa_1 * D_aco * C_precesso_calandragem 			
		<ul style="list-style-type: none"> C_Calandragem= Caland_chapa_1 			
	Custo material	<ul style="list-style-type: none"> C_chapa – Custo associado á chapa escolhida (€/kg) Esp – espessura das chapas (m) Esp_aneis- espessura das chapas de construção dos anéis de reforço (m) Area_chapa_1 – Área das chapas (m²) Area_Chapa_aneis – Área das chapas de construção dos anéis (m²) 	<ul style="list-style-type: none"> C_mat – Custo do material envolvido para a construção da estrutura tubular (€) 	<ul style="list-style-type: none"> A chapa para os anéis considerada é adquirida num todo e posteriormente seccionada de acordo com as necessidades 	

		<ul style="list-style-type: none"> • $Comp_total_vigas_int$ - comprimento total das vigas internas (m) • C_vigas_int - Custo das vigas internas (€/kg) 			
		<ul style="list-style-type: none"> • $C_mat_1 = C_chapa * D_aco * esp * Area_chapa_1 * n_chapa_calandrada_1$ • $C_mat_2 = C_chapa * D_aco * esp_aneis * Area_chapa_aneis$ • $C_mat_3 = C_vigas_int * D_aco * Area_vigas_int * Comp_total_vigas_int$ • $C_mat = C_mat_1 + C_mat_2 + C_mat_3 + C_mat_4$ 			
	Custo soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • F_sold_metod - factor de soldadura para o método adoptado • C_cord_sold - Custo do cordão de soldadura (€/m) • P_sold_chapas - perímetro a soldar em chapas (mm) • P_sold_vigas - perímetro a soldar em vigas (mm) • P_total_sold - perímetro total a soldar (mm) • N_passos_sold - número de passos soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> • C_sold - Custo de soldadura da estrutura (€) 	<ul style="list-style-type: none"> • O método de soldadura adoptado é compreendido entre o método SER e o MAG. • Para diferenciar foi colocado um factor de correcção de 2.5 • O factor $1e3$ traduz a passagem de metros para milímetros 	
		<ul style="list-style-type: none"> • $P_sold_chapas = 4 * dist_total + 2 * \pi * R * (N+4) + (t*2)*2*\pi*R + 4*(T*2)*largura_aneis$ 			

		<ul style="list-style-type: none">• $P_{\text{sold_vigas}} * 2 * (N+1) * (4*\text{dim_x_vigas}+2*\text{dim_y_vigas})$			
		<ul style="list-style-type: none">• $P_{\text{total_sold}} = N_{\text{passos_sold}} * (P_{\text{sold_chapas}} + P_{\text{sold_vigas}})*1e3$			
		<ul style="list-style-type: none">• $C_{\text{sold}} = P_{\text{total_sold}} * C_{\text{cord_sold}}$			
	Custo corte	<ul style="list-style-type: none">• C_{corte} – Custo de corte (€/cm²)• $A_{\text{corte_vigas_int}}$ – Area de corte das vigas internas, aproximada (cm²).• N – numero de secções	<ul style="list-style-type: none">• $C_{\text{total_corte}}$ – Custo total de corte na estrutura tubular (€)	<ul style="list-style-type: none">• Admitiu-se que o ângulo de corte estaria a 45° para efeito de cálculo• Na realidade a secção e corte é curva e não plana.• (N+1) – representa o número de vigas introduzidas na estrutura• 1e4 – traduz a passagem de m² para cm²	<ul style="list-style-type: none">• O factor assumido para esta operação é de f_corte =1
		<ul style="list-style-type: none">• $A_{\text{corte_vigas_int}} = \text{Area_vigas_int} / \cos(\pi/4) * 2*(N+1)*1e4$			
		<ul style="list-style-type: none">• $C_{\text{total_corte}} = C_{\text{corte}}*A_{\text{corte_vigas_int}}$			
	Custo preparação	<ul style="list-style-type: none">• C_prep- Custo de preparação (€/s)• T_prep_corte_sold_1 – tempo de preparação de corte, soldadura e armação das chapas (s)• T_prep_corte_sold_2- tempo de preparação de corte, soldadura e armação das vigas (s)	<ul style="list-style-type: none">• C_total_prep – Custo total de preparação (€).	<ul style="list-style-type: none">• Os tempos admitidos são tempos admitidos como exemplificativos do que poderá demorar o conjunto de operações necessárias para executar a construção da estrutura.• Foi admitido para o tempo de preparação 1 e 2 de 15 e 5 minutos para cada situação, respectivamente.	<ul style="list-style-type: none">• O factor considerado é f_prep= 1.05
<ul style="list-style-type: none">• T_prep_corte_sold_1 = 15*60• T_prep_corte_sold_2 = 5*60					

		<ul style="list-style-type: none">• $C_total_prep_1 = T_prep_corte_sold_1 * (n_chapa_calandrada_1 + 2)* C_prep$• $C_total_prep_2 = T_prep_corte_sold_2 * (N+1)* C_prep$			
		<ul style="list-style-type: none">• $C_total_prep = C_total_prep_1 + C_total_prep_2$			
	Custo pintura	<ul style="list-style-type: none">• A_total_pintura – Area total de pintura (m²)• Dist_total- comprimento total da estrutura (m)• T – número de apoios da estrutura• R – raio da estrutura• Largura_aneis- largura do anéis de reforço (m)• A_pint_vigas_int – Area de pintura das vigas interiores (m²)• Comp_total_vigas_int – comprimento total das vigas interiores (m)	<ul style="list-style-type: none">• C_total_pintura – Custo total de pintura (€)	<ul style="list-style-type: none">• Para a pintura foi considerado o mesmo raio para a estrutura, tanto para a superfície exterior e interior.• Foram considerados os anéis de reforço e as vigas de suporte (vigas internas) da estrutura interior do tapete transportador nos cálculos.	<ul style="list-style-type: none">• A pintura considerada contem uma protecção anti-corrosiva.• O factor de pintura para esta estrutura foi de 2/3, devido ao rendimento de pintura da superfície em causa.• O custo de pintura já contem, o custo de decapagem e pintura.
		<ul style="list-style-type: none">• $A_total_pintura = 2*2 * pi * R * dist_total + T * 2 * pi*((R+Largura_aneis)^2-(R)^2)+ Area_pint_vigas_int*Comp_total_vigas_int;$			
<ul style="list-style-type: none">• $C_total_pintura = C_pintura * A_total_pintura;$					

De forma semelhante à apresentada para a estrutura treliçada é possível apresentar as variáveis críticas para a função de custo.

$f(C_{\text{tub}})=f(R, \text{dist_total}, A_{\text{chapas_1}}, \text{Area_chapas_2}, A_{\text{vigas_int}}, \text{largura_aneis}, N, D_{\text{aco}}, \text{esp_aneis}, \text{Area_chapa_aneis}, \text{dim_x_vigas}, \text{dim_y_vigas}, C_{\text{chapa}}, C_{\text{processo_calandragem}}, f_{\text{mat}}, f_{\text{sold}}, f_{\text{corte}}, f_{\text{prep}}, f_{\text{pint}})$.

Conforme o que foi apresentado para a estrutura treliçada, a divisão da estrutura em módulos leva a um pequeno aumento do custo de fabrico. Neste caso, foi considerado apenas o material (que formará os anéis de junção) e a operação de soldadura necessária, não indo pela alteração dos factores de correcção relacionados com o material, a soldadura, corte, soldadura e preparação dos mesmos.

7 Análise de Resultados

Numa análise estrutural de um projecto é sempre necessário e indispensável ter valores de comparação de tensões máximas admissíveis. Dentro desta necessidade existem vários critérios disponíveis para que se possam executar estudos mais próximos dos limites estruturais ou mais indicados para a segurança dos mesmos. Neste estudo irá seguir-se apenas pelo critério da máxima tensão admissível, que nos leva apenas a considerar o coeficiente de segurança como prioritário para encontrar a tensão máxima admissível na avaliação realizada. Na construção dos modelos foi considerado que o material usado é homogéneo, isotrópico e segue a lei de Hooke (regime elástico).

7.1 Estrutura Trelaçada

7.1.1 Analise Estrutural

Na avaliação da estrutura trelaçada seguindo a utilização dos algoritmos genéticos é possível obter uma série de resultados para os constituintes a colocar de modo a garantir a resistência pretendida para as mesmas. Através do modelo construído são retirados índices relativos aos perfis escolhidos para ocuparem a posição admitida na modelação (Secção 4.3). De acordo com o estabelecido pelo algoritmo genético a solução a escolher será aquela em que o volume será menor traduzindo também uma menor carga nos custos de aquisição do material.

Pelas restrições estabelecidas (Secção 5.3), no programa, é possível responder às características apresentadas nos Eurócodigos e limites materiais. Com os dados recolhidos pode-se construir a Tabela 7.2 e Tabela 7.3 tendo em atenção que o perfil 2 é correspondente a uma espessura de 6mm e 4mm respectivamente e as restantes perfis de 4mm. Tendo em atenção que cada perfil apresentado corresponde a uma dada especificação de barras, como é possível ver na Tabela 7.1.

Tabela 7.1- Perfis e respectivas barras associadas utilizados na optimização com algoritmo genético.

Perfil	Tubos quadrados de 4mm		Tubos rectangulares de 4mm		Tubos rectangulares de 6mm	
	Modelo	Área secção (m ²)	Modelo	Área secção (m ²)	Modelo	Área secção (m ²)
1	25X25	3,188e-4	50X25	5,188e-4	60X40	10,17e-4
2	30X30	3,988e-4	50X25	5,188e-4	80X40	12,57e-4
3	35X35	4,788e-4	50X25	5,188e-4	80X50	13,77e-4
4	40X40	5,588e-4	50X30	5,588e-4	90X50	14,97e-4
5	45X45	6,388e-4	60X40	7,188e-4	100X50	16,17e-4
6	50X50	7,188e-4	80X40	8,788e-4	120X60	19,77e-4
7	60X60	8,788e-4	80X50	9,588e-4	120X80	22,17e-4
8	70X70	10,39e-4	90X50	10,39e-4	140X80	24,57e-4
9	80X80	11,99e-4	100X50	11,19e-4	160X80	26,97e-4
10	90X90	13,59e-4	120X60	13,59e-4	180X80	29,37e-4
11	100X100	15,19e-4	120X80	15,19e-4	180X100	31,77e-4
12	120X120	18,39e-4	140X80	16,79e-4	200X100	34,17e-4
13	140X140	21,59e-4	160X80	18,39e-4	200X100	34,17e-4
14	150X150	23,19e-4	180X80	19,99e-4	200X100	34,17e-4
15	150X150	23,19e-4	180X100	21,59e-4	200X100	34,17e-4
16	150X150	23,19e-4	200X100	23,19e-4	200X100	34,17e-4

Tabela 7.2- Resultados para a estrutura treliçada com uma correia de 650 mm.

Solução	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Volume (m ³)
1	5	6	3	9	1,453
2	4	7	3	9	1,521
3	5	6	3	7	1,375
4	5	6	3	7	1,375
5	5	6	5	9	1,500
6	5	6	3	9	1,453
7	5	7	2	7	1,448
8	5	6	3	7	1,375
9	4	9	3	7	1,636
10	5	7	3	7	1,471
11	4	9	3	7	1,634

Na situação com uma correia de 1600 mm as espessuras admitidas são de 4 mm para todos os perfis considerados.

Tabela 7.3- Resultados para a estrutura treliçada com uma correia de 1600 mm.

Solução	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Volume (m ³)
1	7	12	6	7	1,544
2	7	13	7	9	1,688
3	7	12	6	7	1,544
4	9	13	9	7	1,892
5	7	12	7	9	1,688
6	7	13	9	7	1,747
7	9	13	9	7	1,892
8	7	13	9	7	1,747
9	7	13	9	9	1,845
10	9	13	7	7	1,798
11	7	12	9	7	1,683

Como é visível pelos resultados retirados das simulações corridas através do Matlab, os volumes das estruturas que minimizam o peso e o consequente custo de material são de 1,375 e 1,544 m³.

7.1.2 Análise de Custos

Partindo do que já foi apresentado em relação aos custos envolvidos na construção de uma estrutura destas dimensões e seguindo com as simplificações tomadas para uma mais rápida e eficaz interpretação dos resultados recolheu-se a Tabela 7.4 para a melhor solução encontrada.

Tabela 7.4- Custos totais na estrutura treliçada.

Custo Secção treliçada	
Correia 650 mm	Correia 1600 mm
34.781,00 €	41.411,00 €

Da decomposição que o programa permite retira-se o peso de cada componente do custo:

Tabela 7.5- Parcelas de custos envolvidos na construção da estrutura treliçada.

Custo	Correia de 650 mm	Correia de 1600 mm
Material	15.246,00 €	16.982,00 €
Soldadura	789,00 €	963,00 €
Corte	249,00 €	289,00 €
Preparação	7.070,00 €	7.070,00 €
Pintura	6.167,00 €	8.307,00 €
Chapas lacadas	5.260,00 €	7.800,00 €

Observa-se que os custos de soldadura e preparação são iguais, devido ao que foi admitido anteriormente. Nota-se um aumento de cada parcela de custo de forma não muito significativa em relação à influência dimensional da alteração da correia considerada.

De modo a se conseguir ter uma maior percepção da importância de cada parcela de custo envolvida foram construídas as Fig. 7.1 e Fig. 7.2.

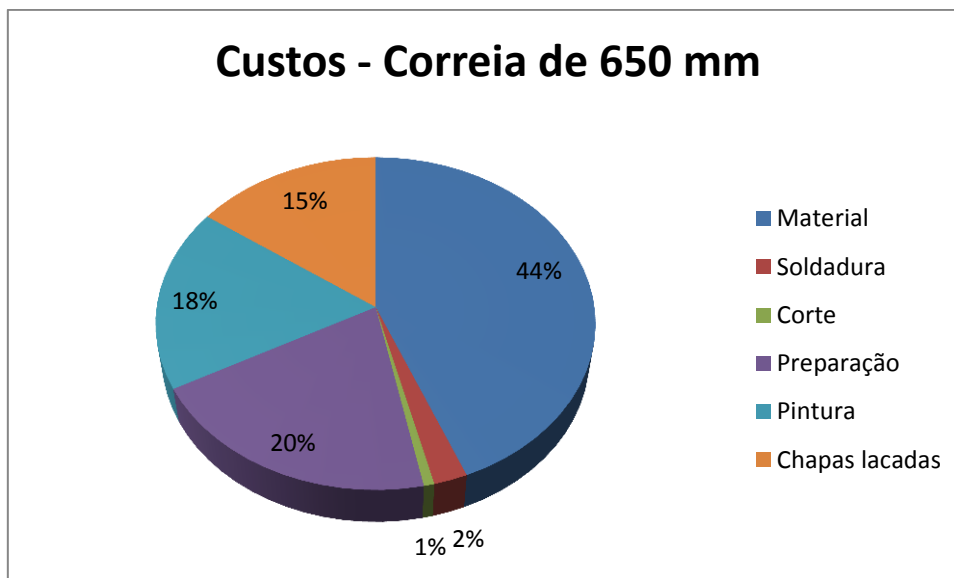


Fig. 7.1- Peso de cada parcela de custo para a estrutura treliçada, correia de 650mm.

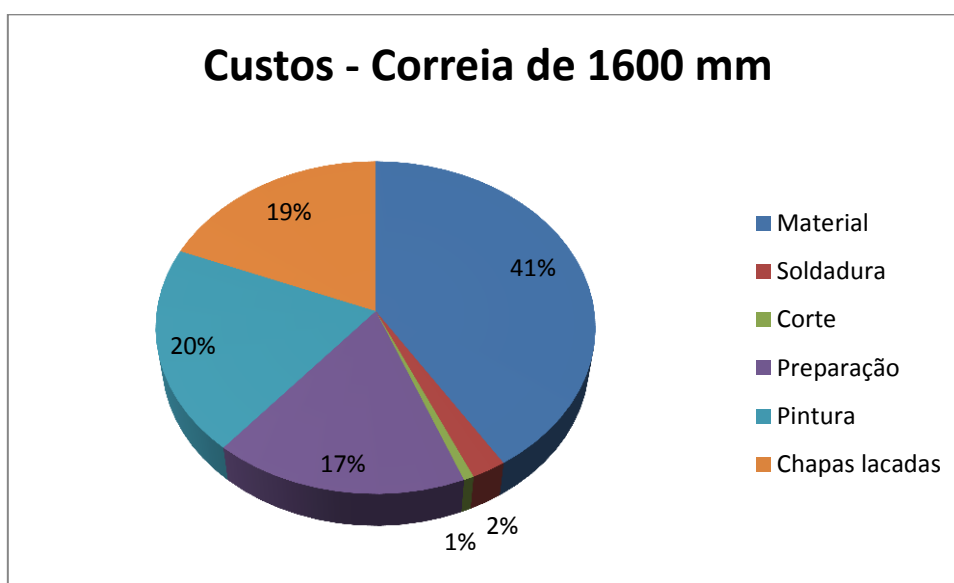


Fig. 7.2- Peso de cada parcela de custo para a estrutura treliçada, correia de 1600mm.

Através de uma análise dos resultados e construindo os gráficos do peso de cada componente considerada no estudo verifica-se rapidamente que os índices mais relevantes para a determinação dos custos envolvidos nesta estrutura são os correspondentes custos do material, da aquisição das chapas lacadas e da pintura.

7.2 Estrutura Tubular

7.2.1 Análise Estrutural

O tipo de análise realizado é bastante diferente do escolhido para a estrutura treliçada, uma vez não existia a necessidade de encontrar um grande número de perfis para esta estrutura e envolvendo uma grande complexidade de construção relativamente ao uso de vários materiais, sendo todos admitidos excepto a espessura da chapa que constitui a maioria do referido “tubo”.

Com a substituição dos valores da espessura espera-se encontrar a menor espessura a usar na estrutura para cada medida de correia admitida. Tendo em atenção que para as zonas de reforço (que acabam por não ter influencia no estudo) optou-se por considerar a existência de uma chapa com mais 20 mm que a que se pretende encontrar para a estrutura principal.

Dos resultados obtidos optou-se por construir a Tabela 7.6 com os valores das tensões máximas registadas nas zonas admitidas para o estudo e do deslocamento máximo registado dos nós que constituem a malha, isto é, as zonas admitidas excluem uma distância estabelecida de 50 cm (dz) das linhas que representam a zona de apoio da estrutura.

Tabela 7.6 – Resultados da estrutura tubular em função da espessura admitida para uma correia de 650 mm com $dz=0,5$.

Espessura (mm)	Tensão máxima registada (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
3	179,24	97,8
4	138,20	72,1
5	112,18	56,8
6	93,86	46,7
7	80,36	39,9

De acordo com a melhor opção registada e recorrendo ao resultado gráfico (Fig. 7.3) fornecido pelo ANSYS pode-se observar que as zonas críticas estão na proximidade das vigas internas que servem de reforço da estrutura.

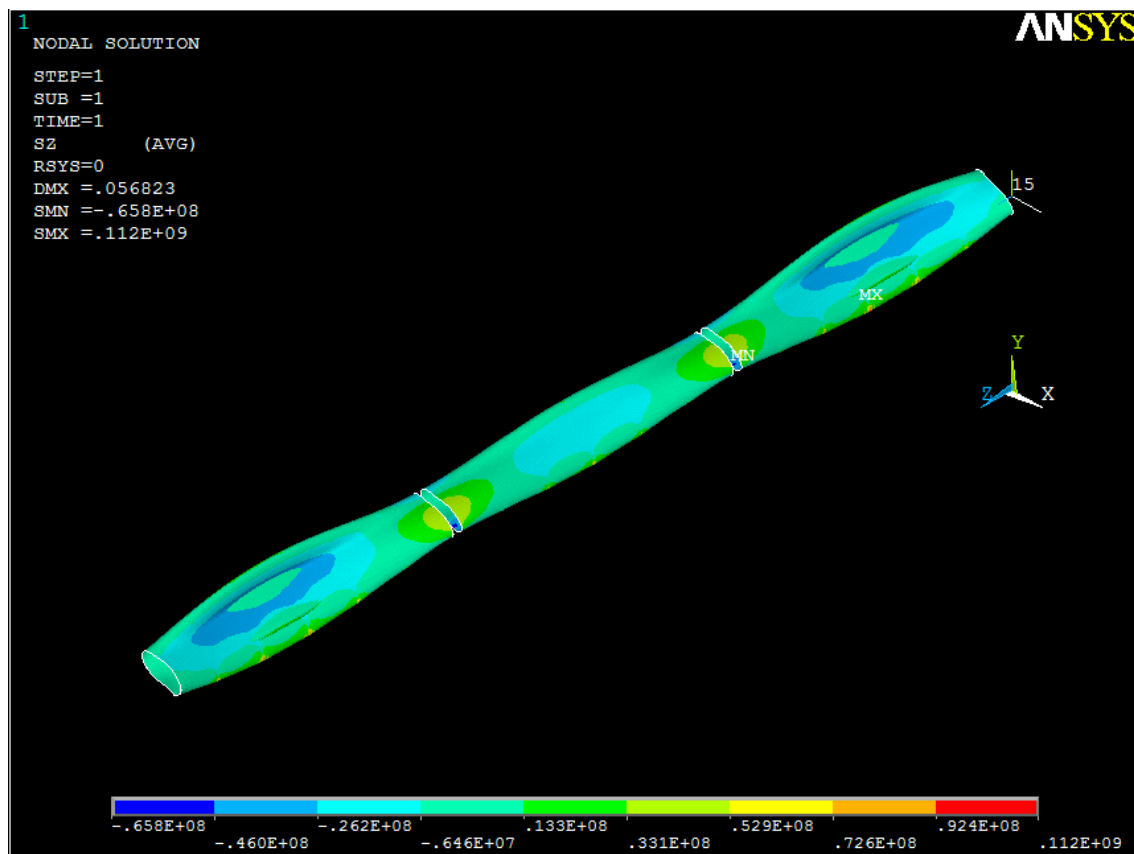


Fig. 7.3-Tensões na estrutura tubular segundo o Eixo Z, com esp=5mm.

Tratando-se de uma comparação entre dimensões da correia e consequente alteração da dimensão da estrutura, na Tabela 7.7 estão presentes os resultados à semelhança do que foi apresentado anteriormente para uma estrutura com uma correia de 1600 mm.

Tabela 7.7 - Resultados da estrutura tubular em função da espessura admitida para uma correia de 1600 mm.

Espessura (mm)	Tensão máxima registrada (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
3	184,19	82,6
4	140,61	69,3
5	115,24	59,5
6	98,22	51,8
7	85,65	45,6

Seguindo a opção registrada anteriormente também é apresentada a imagem gráfica gerada (Fig. 7.4) para a melhor solução apurada.

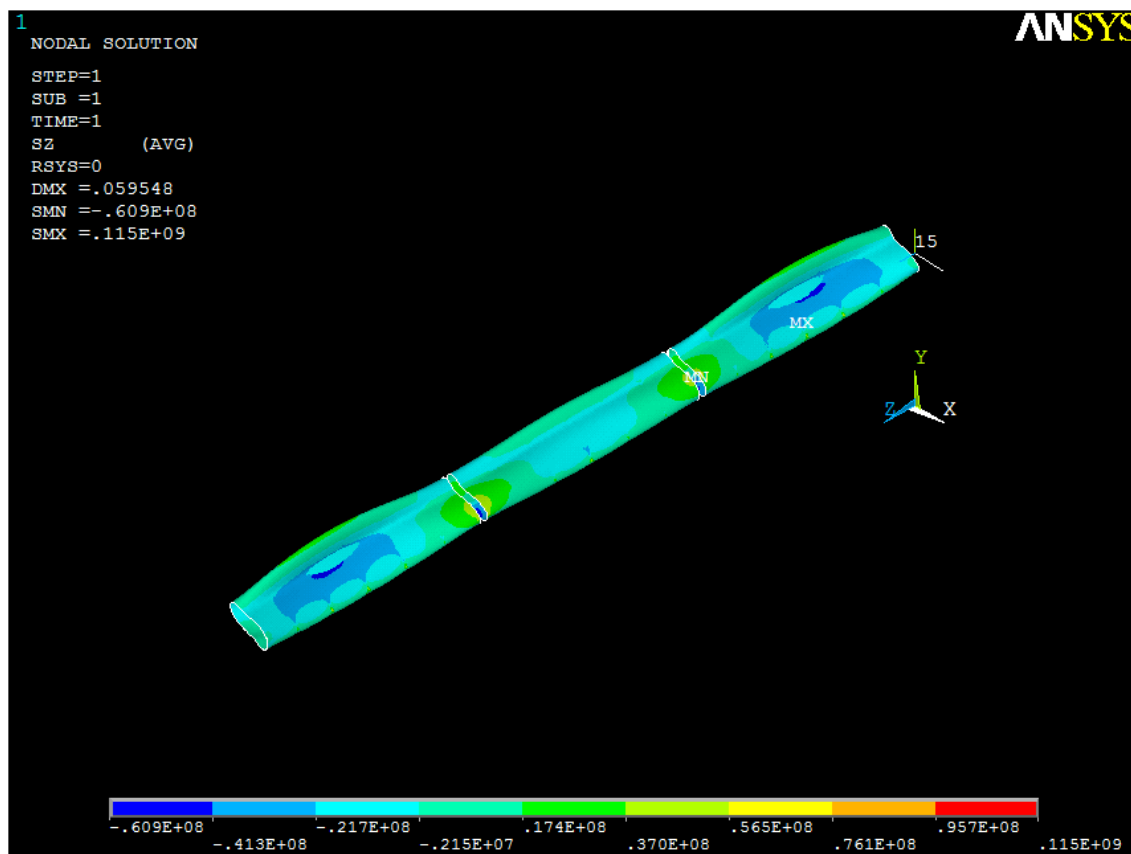


Fig. 7.4-Tensão na estrutura tubular segundo o Eixo Z, com esp=5mm.

Segundo os resultados retirados no software verifica-se que as leituras com maior valor de tensão ocorrem segundo o eixo Z. Para o caso da estrutura com a correia de 650 mm, a tensão segundo o eixo X também se aproxima muito da tensão máxima mas não a ultrapassa, isto para o valor de espessura ótima encontrado. Relativamente aos deslocamentos máximos possíveis admitidos pelos Eurocódigos verifica-se que em ambos os casos não é ultrapassado o seu valor.

7.2.2 Análise de Custos

De acordo com o plano de custos assumido para esta estrutura é admissível encontrar e fazer uma comparação de custos entre a opção de uma correia de 650 e 1600 mm. Para cada situação é apresentada nas Tabela 7.8 e Tabela 7.9, os custos totais e as parcelas de custos relevantes assumidos de cada componente.

Tabela 7.8-Custos totais na estrutura tubular.

Custo Secção tubular	
Correia de 650 mm	Correia de 1600 mm
89.180,00 €	127.600,00 €

Tabela 7.9-Parcelas de custos envolvidos na construção da estrutura tubular.

Custo	Correia de 650 mm	Correia de 1600 mm
Material	40.696,00 €	60.162,00 €
Calandragem	23.580,00 €	35.370,00 €
Soldadura	1.716,00 €	1.992,00 €
Corte	63,00 €	63,00 €
Pintura	22.384,00 €	29.276,00 €
Preparação	740,00 €	740,00 €

As tabelas apresentam o mesmo valor para o custo do corte e preparação, isto deve-se ao que foi admitido anteriormente, pelo que o custo está relacionado com o número de chapas e pelas características das vigas internas, que são as mesmas em ambas as situações. O custo da preparação apresentado também é referente a um determinado tempo de montagem admitido para a armação e preparação das vigas a soldar na estrutura, estando esta última também definida pelo número de vigas existentes. É de notar que o valor do material de uma situação para a outra cresce cerca de 30%, o mesmo é verificado para o custo da calandragem obtido. O custo da soldadura cresce, mas não é tão substancial como os anteriores. Realizando uma análise percentual de custos em termos do peso de cada componente em cada estrutura obtêm-se os gráficos apresentados nas Fig. 7.5 e Fig. 7.6.

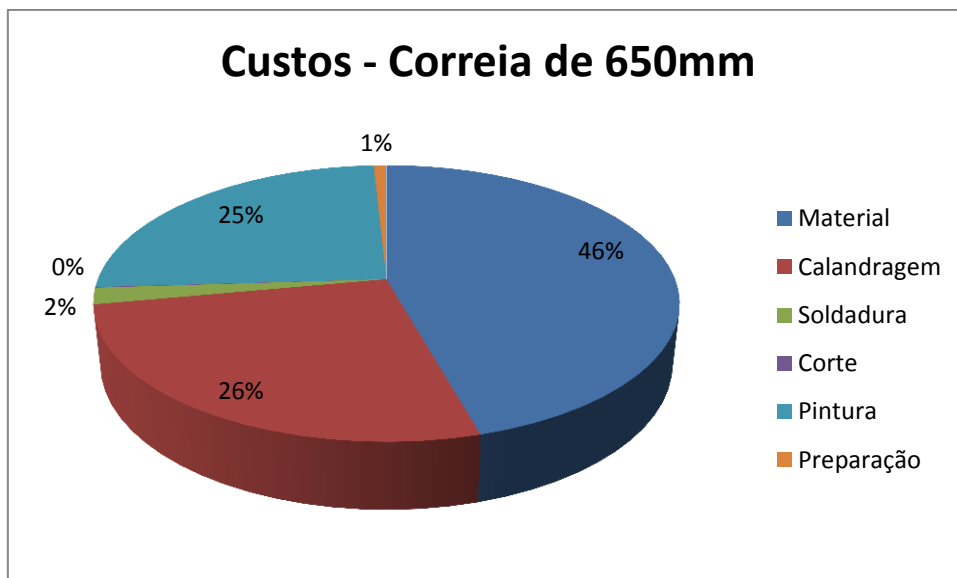


Fig. 7.5- Peso de cada parcela de custo para a estrutura tubular, correia de 650 mm.

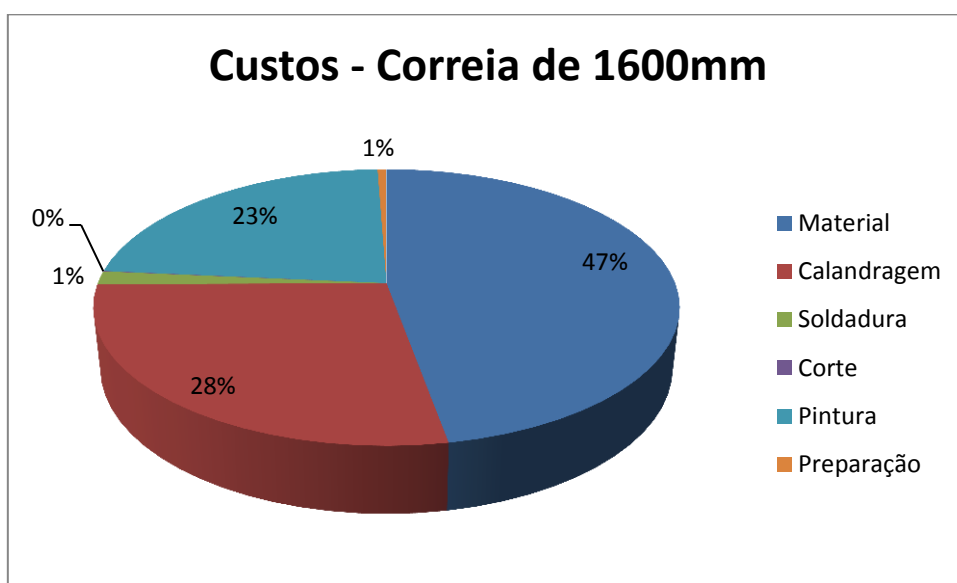


Fig. 7.6- Peso de cada parcela de custo para a estrutura tubular, correia de 1600 mm.

Das percentagens apresentadas é fácil perceber que não existe variação substancial da orientação dos custos na estrutura tubular, mantendo-se a tendência para que os custos mais determinantes na construção sejam os do material e da pintura.

8 Conclusões

Com o estudo efectuado é possível ter uma ideia do custo de cada tipo de estrutura de acordo com a largura de correia admitida.

Do ponto de vista estrutural observa-se uma particularidade na estrutura tubular, uma vez que a espessura obtida para as estruturas com diferentes larguras de correias leva a que a escolha recaia sobre a mesma espessura (5mm) para a chapa principal. Na estrutura treliçada apercebemo-nos que a estrutura requer barras com uma maior área de secção, barras longitudinais, quando é escolhida uma menor largura de correia, notando-se uma maior concentração de tensões na treliça horizontal superior e inferior. O aumento da área de secção leva a que seja necessário a implementação de barras com uma espessura superior de forma a não aumentar em demasia as dimensões exteriores destas. Verifica-se que as barras escolhidas permitem uma soldadura correcta verificada pela dimensão mínima das vigas transversais principais serem sempre superiores à medida que irá unir a esta, não levando a uma deficiência na ligação das barras.

Com a análise apresentada anteriormente é possível observar que o custo de cada estrutura sofre um grande incremento com a operação de pintura, sendo de uma maior relevância na estrutura tubular pelo facto de esta ter uma grande área a tratar e pintar. Para a situação da estrutura treliçada o mesmo não acontece, uma vez que as vigas consideradas têm uma área exposta reduzida comparada à da estrutura tubular. A situação que poderia levar a uma aproximação dos valores seria a necessidade de pintar as chapas de cobertura da estrutura o que levaria a um aumento da área a considerar e a consequente subida do custo de pintura da mesma.

Olhando para o custo geral das estruturas observa-se que o custo envolvido para a construção de uma estrutura tubular é cerca de 2,6 vezes para a situação das estruturas com a correia de 650mm e de cerca de 3,1 vezes para as estruturas com a correia de 1600mm em relação ao custo de construção admitido para a estrutura treliçada.

Em suma, a escolha entre as duas estruturas recai, com vista à redução do custo de implementação do projecto, sobre a estrutura treliçada, uma vez que os custos das duas situações para a estrutura tubular é substancialmente mais cara. A possibilidade de se adoptar por uma estrutura tubular terá de ter em conta aspectos de manutenção a longo prazo, uma vez que esta tem menos pontos de possibilidade de corrosão em comparação com a estrutura treliçada que é composta por muitas quinas soldadas e a existência de chapas lacada também poderão transmitir agentes corrosivos para a estrutura.

9 Trabalhos futuros

Dentro deste capítulo constarão ideias do que poderá ser o trabalho a desenvolver posteriormente por forma a dar continuidade ao esforço tido até ao momento para se conseguir simplificar a orçamentação necessária para responder a uma necessidade real de uma estrutura metálica do tipo galeria aérea para um dado problema, semelhante ao abordado neste estudo.

Para desenvolvimentos futuros haverá a possibilidade de ter uma perspectiva de custo para estruturas com mais ou menos apoios e com carregamentos diferentes. No caso da estrutura tubular, esta necessitaria de uma alteração mais profunda na construção adoptada para que seja possível a alteração do número de pés de apoio a considerar.

A possibilidade de alterar a distância de estudo referente às zonas de reforço, na estrutura tubular, poderá fornecer dados sobre qual a zona mais crítica do projecto. Existe ainda hipótese de alterar a malha escolhida (tipo de treliça) adoptado para a estrutura treliçada, podendo assim se conseguir escolher qual a que se adapta às condições desejadas.

Um ponto de grande importância é a futura verificação da existência do fenómeno de encurvadura nos elementos barras/vigas das estruturas treliçadas e o fenómeno de instabilidade local nas estruturas tubulares, o que poderá obrigar a alterar as dimensões encontradas para os diferentes constituintes das estruturas.

Um estudo que pode ser levado ao nível dos aspectos ambientais na decisão de um projecto mecânico sustentável permitindo a satisfação de aspectos funcionais, económicos e ambientais [22].

Ao longo do trabalho foi necessário concentrar o estudo num comprimento concreto (100 m), com 4 pés de suporte em dois exemplos concretos de tipos de estrutura e duas larguras, podendo este estudo ser alargado a outras situações para verificar se estas conclusões se mantêm.

10 Referências Bibliográficas

- [1] K. Jármai and J. Farkas, “Cost calculation and optimisation of welded steel structures,” *Journal of Construction Steel Research* 50, pp. 115–135, 1999.
- [2] K. C. Sarma and H. Adeli, *Engineering Optimization - Cost optimization of steel structures*, 1^a ed. 2007.
- [3] A. T. Vu and F. Werner, “Optimization of steel frame structures based on differential evolution algorithm,” in *18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering*, 2009.
- [4] J. Jalkanen, “Tubular Truss Optimization Using Heuristic Algorithms,” Tampere University of Technology, 2007.
- [5] M. Hultman, “Weight optimization of steel trusses by a genetic algorithm- Size, shape and topology optimization according to Eurocode,” Lund Institute of Technology, 2010.
- [6] A. J. Reis, “Projecto de estruturas metálicas eurocódigo 3,” in *Eurocódigos Estruturais: o início da sua aplicação em Portugal*, 2010.
- [7] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mecânica dos Materiais*, 3^a Edição. McGraw Hill Brasil.
- [8] CHAGAS S.A., *Manual Técnico de Produtos Siderúrgicos*, 7^a EDIÇÃO. 2011.
- [9] www.lupral.com, “Chapas lacada e zincadas.” .
- [10] Rulli Rulmeca.S.p.A, *Rollers and components for bulk handling*, 4^a EDIÇÃO. 2003.
- [11] P. Mendes, “Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento,” in *Eurocódigos Estruturais: o início da sua aplicação em Portugal*, 2010.
- [12] B. S. Massey, *Mecânica dos fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [13] Ansys, “Help Topics.” .
- [14] A. Mittal, P. T. and Corus, S. Allience, SCI, and CTICM, “Part 5: Detailed Design of Trusses,” in *Single-Storey Steel Buildings*, 2010.
- [15] P. S. G. Coelho, “Meta-Heurísticas Aplicadas em Optimização Estrutural,” 2003.
- [16] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, the university of Michigan Press, 1975.
- [17] C. M. Branco, J. M. Ferreira, J. D. da Costa, and A. S. Ribeiro, *Projecto de Órgãos de Máquinas*, 2^a edição. Fundação Calouste Gulbenkian, 2008.

- [18] [Http://pt.esab.net/pt](http://pt.esab.net/pt), “<http://pt.esab.net/pt/pt/education/procesos-migmag-gmaw.cfm>.” .
- [19] “[Http://www.ruisantos-sa.com/](http://www.ruisantos-sa.com/).” .
- [20] SIDERVI, “Tabela de Preços,” *nº 4, Outubro*. 2006.
- [21] J. Fradinho, A. J. A. M. Martinho, and A. Mourão, “Integração do custo e do desempenho na fase inicial do projecto de produtos - estudo de caso de reservatórios pressurizados.” 2011.
- [22] J. Fradinho, V. Sobral, A. G. Santos, A. J. A. M. Martinho, and A. Mourão, “Contributo metodológico para a tomada de decisão em projecto mecânico sustentável - caso de uma estrutura tubular,” in *ICEUBI 2013- International Conference on Engineering*, 2013.

ANEXOS

ANEXO I – Tabelas de tubos estruturais quadrados CHAGAS.

ANEXO II - Tabelas de tubos estruturais rectangulares CHAGAS.

ANEXO III- Tabela de vigas IPE CHAGAS

ANEXO IV – Programação em Ansys para a estrutura treliçada.

ANEXO V – Programação em Matlab para a estrutura treliçada.

ANEXO VI – Programação em Ansys para a estrutura tubular.

ANEXO VII – Programação em Matlab para o custo da estrutura tubular.

ANEXO VIII – Programação em Matlab para o custo da estrutura tubular.

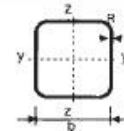
ANEXO I – Tabelas de tubos estruturais quadrados CHAGAS.

Tubo Estrutural Laminado a Quente Quadrado

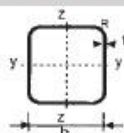
CHAGAS

Norma Dimensional - EN 10210-1

Material S355 J2 H



b mm	t mm	M Kg/m	A cm²	I cm²	i cm	W _{el} cm³	W _{pl} cm³	I _t cm²	C _t cm²	S m²/ton.
25	2	1,41	1,797	1,561	0,932	1,249	1,534	2,524	1,811	67,24
25	3	2	2,543	1,999	0,8865	1,599	2,06	3,35	2,299	46,22
25	4	2,5	3,188	2,51	0,8402	1,801	2,438	3,895	2,575	35,84
30	2	1,72	2,197	2,837	1,136	1,891	2,288	4,532	2,754	66,59
30	3	2,47	3,143	3,743	1,091	2,495	3,138	6,164	3,601	45,5
30	4	3,13	3,988	4,358	1,045	2,906	3,805	7,388	4,169	35,04
30	5	3,71	4,732	4,721	0,9989	3,147	4,297	8,21	4,498	28,84
35	4	3,76	4,788	7,485	1,25	4,277	5,472	12,48	6,155	34,51
35	6	5,16	6,574	8,808	1,158	5,033	6,914	15,37	7,19	21,14
40	2	2,35	2,997	7,153	1,545	3,577	4,247	11,25	5,237	65,82
40	3	3,41	4,343	9,775	1,5	4,888	5,97	15,74	7,097	44,66
40	4	4,39	5,588	11,83	1,455	5,915	7,439	19,48	8,536	34,12
40	5	5,28	6,732	13,37	1,409	6,684	8,663	22,5	9,602	27,84
40	6	6,1	7,774	14,44	1,363	7,22	9,652	24,8	10,34	23,69
45	4	5,01	6,388	17,59	1,659	7,819	9,706	28,68	11,31	33,84
45	5	6,07	7,732	20,14	1,614	8,952	11,41	33,5	12,89	27,54
50	3	4,35	5,543	20,2	1,909	8,08	9,702	32,06	11,79	44,18
50	4	5,64	7,188	24,97	1,864	9,99	12,27	40,39	14,49	33,62
50	5	6,85	8,732	28,88	1,819	11,55	14,53	47,56	16,67	27,3
50	6	7,99	10,17	31,98	1,773	12,79	16,48	53,6	18,39	23,11
50	8	10	12,75	36,01	1,68	14,4	19,5	62,32	20,6	17,92
60	3	5,29	6,743	36,21	2,317	12,07	14,33	56,95	17,68	43,88
60	4	6,9	8,788	45,39	2,273	18,21	18,31	72,51	22,03	33,3
60	5	8,42	10,73	53,26	2,228	17,75	21,89	86,4	25,72	26,96
60	6	9,87	12,57	59,89	2,182	19,96	25,11	98,63	28,81	22,75
60	8	12,5	15,95	69,73	2,091	23,24	30,44	118,2	33,35	17,52
60	10	14,9	18,93	75,54	1,998	25,18	34,38	131,4	35,99	14,42
70	3	6,24	7,943	59,02	2,726	16,86	19,87	92,19	24,76	43,66
70	4	8,15	10,39	74,69	2,681	21,34	25,54	118,2	31,16	33,07
70	5	9,99	12,73	88,5	2,637	25,29	30,76	142	36,76	26,73
70	6	11,8	14,97	100,6	2,591	28,73	35,53	163,5	41,6	22,51
70	8	15	19,15	119,8	2,5	34,22	43,77	199,7	49,24	17,25
70	10	18	22,93	133	2,408	37,99	50,34	227,1	54,45	14,13
80	3	7,18	9,143	89,82	3,134	22,46	26,3	139,6	33,04	43,51
80	4	9,41	11,99	114,5	3,09	28,61	33,98	180	41,9	32,91
80	5	11,6	14,73	136,6	3,045	34,15	41,13	217,4	49,79	26,56
80	6	13,6	17,37	156,4	3	39,1	47,76	251,8	56,78	22,33
80	8	17,5	22,35	189,3	2,91	47,32	59,51	311,7	68,29	17,06
80	10	21,1	26,93	213,9	2,818	53,47	69,3	360	76,82	13,92
80	12	24,4	31,09	231	2,726	57,76	77,22	396,9	82,7	11,84
90	3	8,12	10,34	129,8	3,543	28,85	33,63	200,9	42,53	43,39
90	4	10,7	13,59	166,3	3,498	36,95	43,61	260,1	54,23	32,78
90	5	13,1	16,73	199,6	3,454	44,35	52,99	315,5	64,81	26,43
90	6	15,5	19,77	229,8	3,409	51,07	61,79	367,1	74,31	22,2
90	8	20,1	25,55	281,5	3,319	62,55	77,65	459	90,5	16,92
90	10	24,3	30,93	322,3	3,228	71,61	91,27	536	103,1	13,77
90	12	28,2	35,89	353	3,136	78,45	102,7	598,4	112,6	11,68

CHAGAS**Tubo Estrutural Laminado a Quente
Quadrado**

Norma Dimensional - EN 10210-1

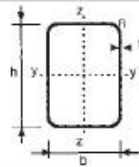
Material S355 J2 H

b mm	t mm	M Kg/m	A cm ²	I cm ⁴	i cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ²	S m ² /ton.
100	3	9,06	11,54	180,2	3,951	36,04	41,86	278,1	53,21	43,29
100	4	11,9	15,19	231,8	3,907	46,36	54,44	361,1	68,15	32,69
100	5	14,7	18,73	279,4	3,862	55,89	66,36	439,4	81,83	26,33
100	6	17,4	22,17	323,2	3,818	64,64	77,61	513	94,3	22,09
100	8	22,6	28,75	399,6	3,728	79,92	98,18	646,2	115,9	16,81
100	10	27,4	34,93	462,1	3,637	92,42	116,2	761	133,4	13,65
100	12	31,9	40,69	511,7	3,546	102,3	131,8	857,6	147,1	11,55
120	3	10,9	13,94	316,9	4,768	52,82	61,02	486,7	78,17	43,15
120	4	14,4	18,39	410,3	4,723	68,38	79,71	635,1	100,8	32,54
120	5	17,8	22,73	497,7	4,679	82,95	97,59	776,5	121,9	26,18
120	6	21,1	26,97	579,4	4,635	96,57	114,7	911,2	141,4	21,94
120	8	27,6	35,15	726,3	4,545	121,1	146,5	1160	176,2	16,65
120	10	33,7	42,93	852,1	4,455	142	175,2	1382	205,8	13,48
120	12	39,5	50,29	958,2	4,365	159,7	200,8	1578	230,5	11,37
140	3	12,8	16,34	509,6	5,584	72,81	8,79	780,1	107,9	43,05
140	4	16,9	21,59	662,6	5,54	94,66	109,8	1021	139,9	32,44
140	5	21	26,73	807,5	5,496	115,4	134,8	1253	169,9	26,07
140	6	24,9	31,77	944,3	5,452	134,9	158,9	1475	198,1	21,83
140	8	32,6	41,55	1195	5,363	170,7	204,3	1892	249,3	16,54
140	10	40	50,93	1416	5,273	202,3	246,1	2272	294,1	13,36
140	12	47	59,89	1609	5,183	229,9	284,3	2616	332,8	11,25
150	4	18,2	23,19	820,5	5,948	109,4	126,6	1262	161,8	32,4
150	5	22,6	28,73	1002	5,904	133,6	155,7	1550	196,9	26,03
150	6	26,8	34,17	1174	5,86	156,5	183,7	1828	230	21,79
150	8	35,1	44,75	1491	5,771	198,7	236,9	2351	290,6	16,49
150	10	43,1	54,93	1773	5,682	236,4	286	2832	344,2	13,32
150	12	50,8	64,69	2023	5,592	269,7	331,4	3272	391,1	11,21
150	14	58,1	74,06	2241	5,501	298,9	372,9	3669	431,9	9,701
160	5	24,1	30,73	1225	6,313	153,1	178,1	1892	225,9	26
160	6	28,7	36,57	1437	6,268	179,6	210,4	2233	264,4	21,75
160	8	37,6	47,95	1831	6,18	228,9	271,8	2880	335,2	16,45
160	10	46,3	58,93	2186	6,09	273,2	329	3478	398,3	13,28
160	12	54,6	69,49	2502	6,001	312,8	382,1	4028	454,2	11,17
160	14	62,5	79,66	2783	5,91	347,8	431,1	4531	503,4	9,658
180	5	27,3	34,73	1765	7,129	196,1	227,3	2718	289,9	25,94
180	6	32,3	41,37	2077	7,085	230,8	269	3215	340,2	21,69
180	8	42,7	54,35	2661	6,997	295,6	348,9	4162	433,8	16,39
180	10	52,5	66,93	3193	6,908	354,8	423,9	5048	518,5	13,21
180	12	62,1	79,09	3677	6,818	408,5	494,3	5873	594,8	11,1
200	5	30,4	38,73	2445	7,946	244,5	282,5	3756	361,9	25,89
200	6	36,2	46,17	2883	7,902	288,3	334,9	4449	425,7	21,64
200	8	47,7	60,75	3709	7,813	370,9	435,6	5778	545,2	16,34
200	10	58,8	74,93	4471	7,725	447,1	530,9	7031	654,6	13,16
200	12	69,6	88,69	5171	7,635	517,1	620,9	8208	754,4	11,05
200	14	80,1	102,1	5811	7,546	581,1	705,8	9311	845,1	9,536

ANEXO II - Tabelas de tubos estruturais retangulares CHAGAS.

CHAGAS

Tubo TPS Laminado a Quente Rectangular



Norma Dimensional - EN 10210-1

Material S355 J2 H

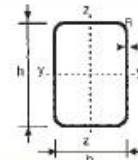
h m/m	b m/m	t m/m	M Kgs/m	A cm²	L _y cm	L _z cm	I _y cm	I _z cm	W _{ely} cm³	W _{elz} cm³	W _{ply} cm³	W _{piz} cm³	I _t cm⁴	C _t cm	S m²/T
50	25	2,5	2,69	3,433	10,41	3,394	1,741	0,9943	4,163	2,715	5,326	3,222	8,42	4,61	53,27
50	25	3	3,17	4,043	11,9	3,825	1,716	0,9726	4,762	3,06	6,177	3,71	9,644	5,203	44,82
50	25	4	4,07	5,188	14,37	4,482	1,664	0,9295	5,747	3,586	7,673	4,538	11,65	6,111	34,3
50	30	2,5	2,89	3,683	11,82	5,225	1,791	1,191	4,727	3,483	5,92	4,112	11,70	5,790	53,12
50	30	3	3,41	4,343	13,56	5,939	1,767	1,169	5,425	3,959	6,882	4,758	13,50	6,510	44,66
50	30	4	4,39	5,588	16,49	7,084	1,718	1,126	6,596	4,722	8,593	5,885	16,6	7,771	34,12
60	40	3	4,35	5,543	26,46	13,89	2,185	1,583	8,819	6,946	10,91	8,19	29,23	11,2	44,18
60	40	4	5,64	7,188	32,83	17,03	2,137	1,539	10,94	8,517	13,83	10,32	36,66	13,71	33,62
60	40	5	6,85	8,732	38,09	19,53	2,089	1,496	12,7	9,767	16,39	12,16	42,98	15,71	27,3
60	40	6	7,99	10,17	42,32	21,45	2,04	1,452	14,11	10,72	18,63	13,73	48,2	17,26	23,11
60	40	8	10	12,75	47,93	23,75	1,939	1,365	15,98	11,87	22,12	16,08	55,41	19,16	17,92
80	40	3	5,29	6,743	54,23	18,01	2,836	1,634	13,56	9,004	17,06	10,41	43,79	15,31	43,88
80	40	4	6,9	8,788	68,2	22,24	2,786	1,591	17,05	11,12	21,82	13,2	55,19	18,9	33,3
80	40	5	8,42	10,73	80,28	25,7	2,785	1,548	20,07	12,85	26,13	15,66	65,05	21,85	26,96
80	40	6	9,87	12,57	90,54	28,46	2,683	1,504	22,64	14,23	30	17,81	73,41	24,23	22,75
80	40	8	12,5	15,95	106	32,11	2,578	1,419	26,5	16,05	36,47	21,2	85,76	27,46	17,52
80	40	10	14,9	18,93	115,2	33,71	2,467	1,335	28,8	16,85	41,3	23,45	92,54	28,9	14,42
80	50	3	5,76	7,343	63,13	30,15	2,932	2,026	15,78	12,06	19,37	13,93	64,85	19,73	43,76
80	50	4	7,53	9,588	79,77	37,7	2,884	1,983	19,94	15,08	24,86	17,79	82,55	24,63	33,17
80	50	5	9,21	11,73	94,36	44,13	2,836	1,939	23,59	17,65	29,88	21,28	98,36	28,8	26,83
80	50	6	10,8	13,77	107	49,51	2,787	1,896	26,75	19,8	34,44	24,4	112,3	32,31	22,62
80	50	8	13,8	17,55	126,8	57,43	2,688	1,809	31,7	22,97	42,23	29,58	134,6	37,53	17,37
80	50	10	16,4	20,93	139,9	62,06	2,585	1,722	34,97	24,82	48,3	33,41	149,8	40,65	14,26
90	50	3	6,24	7,943	84,38	33,47	3,259	2,053	18,75	13,39	23,19	15,34	79,49	22,38	43,66
90	50	4	8,15	10,39	107,1	41,95	3,211	2,009	23,8	16,78	29,85	19,63	97,52	28,02	33,07
90	50	5	9,99	12,73	127,3	49,21	3,162	1,966	28,28	19,69	35,99	23,53	116,4	32,86	26,73
90	50	6	11,8	14,97	145	55,36	3,112	1,923	32,22	22,14	41,63	27,04	133,1	36,96	22,51
90	50	8	15	19,15	173,6	64,58	3,01	1,836	38,57	25,83	51,41	32,94	160,3	43,21	17,25
90	50	10	18	22,93	193,6	70,22	2,906	1,75	43,02	28,09	59,27	37,41	179,3	47,12	14,13
100	50	3	6,71	8,543	109,6	36,79	3,582	2,075	21,92	14,72	27,31	16,75	88,37	26,03	43,58
100	50	4	8,78	11,19	139,6	46,19	3,532	2,032	27,92	18,48	35,24	21,47	112,8	31,4	32,98
100	50	5	10,8	13,73	166,5	54,3	3,482	1,989	33,3	21,72	42,61	25,78	134,7	36,91	26,64
100	50	6	12,7	16,17	190,5	61,2	3,432	1,945	38,09	24,48	49,41	29,68	154,3	41,62	22,41
100	50	8	16,3	20,75	229,9	71,72	3,328	1,859	45,98	28,69	61,38	36,3	186,4	48,89	17,15
100	50	10	19,6	24,93	258,8	78,39	3,222	1,773	51,75	31,36	71,23	41,41	209,4	53,61	14,02
120	60	3	8,12	10,34	193,7	65,48	4,328	2,516	32,28	21,83	39,96	24,59	156	37,16	43,39
120	60	4	10,7	13,59	248,7	83,09	4,278	2,473	41,46	27,7	51,87	31,75	200,7	47,1	32,78
120	60	5	13,1	16,73	299,2	98,76	4,229	2,43	49,87	32,92	63,09	38,39	241,8	55,95	26,43
120	60	6	15,5	19,77	345,3	112,6	4,179	2,386	57,55	37,53	73,63	44,55	279,4	63,78	22,2
120	60	8	20,1	25,55	424,7	135,1	4,077	2,3	70,79	45,05	92,7	55,4	344,3	76,64	16,92
120	60	10	24,3	30,93	488,1	151,5	3,973	2,214	81,36	50,51	109,2	64,38	395,7	86,13	13,77
120	60	12	28,2	35,89	536,6	162,6	3,866	2,128	89,43	54,18	123,1	71,56	434,2	92,63	11,88
120	80	3	9,06	11,54	234,8	125,4	4,51	3,296	39,13	31,35	46,98	35,54	254,9	50,82	43,29
120	80	4	11,9	15,19	302,6	160,7	4,463	3,253	50,43	40,18	61,15	46,14	330,4	64,98	32,69
120	80	5	14,7	18,73	365,4	192,9	4,417	3,209	60,9	48,24	74,59	56,13	401,3	77,88	26,33
120	80	6	17,4	22,17	423,3	220,3	4,369	3,166	70,56	55,56	87,31	65,52	467,6	89,58	22,09
120	80	8	22,6	28,75	525,3	272,6	4,274	3,079	87,54	68,14	110,6	82,55	586,6	109,71	16,81

Tubo Estrutural Laminado a Quente Rectangular

CHAGAS

Norma Dimensional - EN 10210-1

Material S355 J2 H

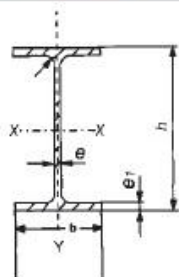


h m/m	b m/m	t m/m	M Kgs/m	A cm²	I _y cm⁴	I _z cm⁴	I _y cm	I _z cm	W _{ely} cm³	W _{elz} cm³	W _{ply} cm²	W _{plz} cm²	I _t cm⁴	C _t cm²	S m²/T
120	80	8	22,6	28,75	525,3	272,6	4,274	3,079	87,54	68,14	110,6	82,55	586,6	109,71	16,81
140	80	3	10	12,74	340,7	143,2	5,171	3,352	48,67	35,8	59,13	40,16	316,4	59,71	43,21
140	80	4	13,2	16,79	440,6	183,8	5,123	3,309	62,94	45,96	77,14	52,22	410,7	76,53	32,61
140	80	5	16,3	20,73	534	221,1	5,075	3,266	76,28	55,28	94,32	63,63	499,4	91,94	26,25
140	80	6	19,3	24,57	620,9	255,2	5,027	3,222	88,7	63,8	110,7	74,4	582,6	106	22,01
140	80	8	25,1	31,95	776,3	314,2	4,929	3,136	110,9	78,55	141	94,07	732,9	130,9	16,72
140	80	10	30,6	38,93	908,1	361,9	4,83	3,049	129,7	90,47	168,1	111,3	862,1	150,3	13,56
140	80	12	35,7	45,49	1017	399,2	4,729	2,962	145,3	99,81	192,1	126,2	970,4	166	11,45
150	50	3	9,06	11,54	305,8	53,38	5,147	2,15	40,77	21,35	52,42	23,8	149,9	38,3	43,29
150	50	4	11,9	15,19	394,1	67,4	5,094	2,107	52,54	26,96	68,21	30,67	191,8	48,36	32,69
150	50	5	14,7	18,73	475,8	79,71	5,04	2,063	63,44	31,89	83,19	37,03	229,8	57,22	26,33
150	50	6	17,4	22,17	551,1	90,42	4,985	2,019	73,48	36,17	97,35	42,88	263,9	64,95	22,09
150	50	8	22,6	28,75	683,2	107,4	4,874	1,993	91,09	42,97	123,3	53,1	321,1	77,37	16,81
150	50	10	27,4	34,93	791,5	119,2	4,761	1,848	105,5	47,69	146	61,41	364,3	86,14	13,65
150	50	12	31,9	40,69	877,4	126,6	4,643	1,764	117	50,65	165,8	67,9	394,1	91,74	11,55
150	100	3	11,4	14,54	467,9	250,8	5,672	4,153	62,39	50,16	74,47	56,41	506,2	81,43	43,12
150	100	4	15,1	19,19	607,3	324	5,626	4,109	80,97	64,81	97,41	73,64	660,1	105	32,51
150	100	5	18,6	23,73	738,7	392,3	5,579	4,066	98,5	78,47	119,4	90,11	806,7	126,9	26,15
150	100	6	22,1	28,17	862,3	455,9	5,532	4,023	115	91,18	140,5	105,8	946,1	147,3	21,91
150	100	8	28,9	36,75	1087	569,3	5,438	3,936	144,9	113,9	180,1	135	1203	183,5	16,62
150	100	10	35,3	44,93	1282	665,4	5,343	3,849	171	133,1	216	161,2	1432	214,2	13,45
150	100	12	41,4	52,69	1450	745,4	5,246	3,761	193,4	149,1	248,6	184,6	1633	239,9	11,34
160	80	3	10,9	13,94	472,1	161	5,819	3,398	59,01	40,25	72,47	44,78	379,6	68,61	43,15
160	80	4	14,4	18,39	612,2	207	5,77	3,355	76,53	51,74	94,73	58,3	493	88,08	32,54
160	80	5	17,8	22,73	744	249,3	5,721	3,312	93	62,32	116,1	71,13	600	106	26,18
160	80	6	21,2	26,97	867,7	288,1	5,672	3,268	108,5	72,03	136,5	83,28	700,6	122,5	21,94
160	80	8	27,6	35,15	1091	355,8	5,572	3,182	136,4	88,96	174,5	105,6	883,1	151,2	16,65
160	80	10	33,7	42,93	1284	411,2	5,47	3,095	160,6	102,8	209	125,3	1041	174,8	13,48
160	80	12	39,5	50,29	1449	455,3	5,367	3,009	181,1	113,8	240	142,5	1175	193,8	11,37
180	80	3	11,9	15,14	631,4	178,8	6,457	3,436	70,15	44,7	87,01	49,4	444,1	77,5	43,09
180	80	4	15,7	19,99	820,6	230,1	6,407	3,393	91,18	57,52	113,9	64,38	577	99,64	32,48
180	80	5	19,4	24,73	999,5	277,4	6,357	3,349	111,1	69,36	139,8	78,63	702,6	120,1	26,12
180	80	6	23,1	29,37	1168	321	6,307	3,305	129,8	80,26	164,6	92,16	820,9	138,9	21,88
180	80	8	30,1	38,35	1477	397,5	6,205	3,219	164,1	99,37	211,3	117,1	1036	172	16,59
180	80	10	36,8	46,93	1747	460,6	6,101	3,133	194,1	115,1	253,9	139,3	1223	199,4	13,42
180	80	12	43,2	55,09	1981	511,4	5,996	3,047	220,1	127,8	292,7	158,8	1382	221,8	11,31
180	100	3	12,8	16,34	725,4	293,1	6,662	4,235	80,6	58,63	97,63	65,14	652,7	98,36	43,05
180	100	4	16,9	21,59	944,5	379,4	6,614	4,192	104,9	75,87	128	85,16	852,1	127,1	32,44
180	100	5	21	26,73	1153	460,1	6,567	4,149	128,1	92,02	157,3	104,4	1042	154	26,07
180	100	6	24,9	31,77	1350	535,5	6,518	4,105	150	107,1	185,5	122,7	1224	179,1	21,83
180	100	8	32,6	41,55	1713	671,1	6,421	4,019	190,4	134,2	238,8	157,1	1560	224,1	16,54
180	100	10	40	50,93	2036	787,4	6,323	3,932	226,2	157,5	287,9	188,2	1862	262,8	13,36
180	100	12	47	59,89	2320	885,7	6,224	3,845	257,8	177,1	333	216,3	2130	295,7	11,25
200	100	4	18,2	23,19	1223	416,2	7,261	4,237	122,3	83,25	150,4	92,84	983,4	141,9	32,4
200	100	5	22,6	28,73	1495	505,3	7,213	4,194	149,5	101,1	185	113,9	1204	172	26,03
200	100	6	26,8	34,17	1754	588,6	7,164	4,15	175,4	117,7	218,5	134	1414	200,3	21,79
200	100	8	35,1	44,75	2234	739	7,065	4,064	223,4	147,8	282	171,8	1804	251,2	16,49

ANEXO III- Tabela de vigas IPE CHAGAS

CHAGAS

Perfis IPE



Norma Dimensional DIN 1025 parte 5

(Euronorm 19)

Norma Material DIN 17100 / EN 10025

h = Altura total ou nominal
 b = Largura das abas
 e = Espessura da alma
 e_1 = Espessura da aba
 r = Raio de concordância entre a alma e a aba
 I = Momento de inércia
 w = Módulo resistente
 i = Raio de giração = $\sqrt{I/A}$
 A = Área da secção recta transversal
 m = Massa por metro

Designação do perfil	Medidas mm					A cm ²	M Kg / m
	h	b	e	e ₁	r		
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	7,64	6,0
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	10,3	8,1
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	13,2	10,4
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	16,4	12,9
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9	20,1	15,8
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9	23,9	18,8
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12	28,5	22,4
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12	33,4	26,2
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15	39,1	30,7
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15	45,9	36,1
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15	53,8	42,2
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18	62,6	49,1
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18	72,7	57,1
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21	84,5	66,3
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21	98,8	77,6
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21	116	90,7
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24	134	106
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24	156	122

ANEXO IV – Programação em Ansys para a estrutura treliçada.

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!! OPTIMIZACAO DE UMA ESTRUTURA TRELIÇADA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!! PARA UMA LARGURA DE TELA E DISTANCIA ENTRE VÃOS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!! VASCO SOBRAL ||||| FCT/UNL !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
/PREP7          !*** PRÉ-PROCESSAMENTO ***
```

```
! DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO
```

```
!ET,1,LINK8
```

```
ET,1,LINK180
```

```
!ET,1,BEAM188
```

```
MPTEMP,,,,,,,,
```

```
MPTEMP,1,0
```

```
MPDATA,DENS,1,,7860
```

```
MPDATA,EX,1,,210e9
```

```
MPDATA,PRXY,1,,0.3
```

```
/INPUT,'seccoes_1','txt',,
```

```
/INPUT,'seccoes_2','txt',,
```

```
/INPUT,'seccoes_3','txt',,
```

```
/INPUT,'seccoes_4','txt',,
```

```
!DADOS:
```

```
/INPUT,'dados_2','txt',,
```

```
H=20 ! altura da estrutura ao solo em metros
```

```
N,1,0,H,0
```

```
N,2,largura_inf,H,0
```

```
N,3,largura_inf,altura+H,0
```

```
N,4,0,altura+H,0
```

```
N,n*5-((n-1)*1),0,H,n*dist
```

```
N,n*6-((n-1)*2),largura_inf,H,n*dist
```

```
N,n*7-((n-1)*3),largura_inf,altura+H,n*dist
```

```
N,n*8-((n-1)*4),0,altura+H,n*dist
```

```
NGEN,n,4,1,2,,,dist,1
```

```
NGEN,n,4,3,4,,,dist,1
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,1
```

```
EN,1,1,2
```

```
EN,2,2,3
```

```
EN,3,3,4
```

```
EN,4,4,1
```

```
!!!!!! LIGAR TODOS OS PONTOS DAS SECÇÕES RECTANGULARES!!!!
```

```
*DO,H,1,n
```

```
EN,H+4,1+4*(H),4+4*(H)
```

```
EN,H+4+n,2+4*(H),1+4*(H)
```

```
EN,H+4+2*n,2+4*H,3+4*H
```

```
EN,H+4+3*n,3+4*H,4+4*H
```

```
*ENDDO
```

```
!!!!!! LIGAR TODOS OS PONTOS LONGITODINAIS!!!!
```

```
REAL,2
```

```
*Do,J,1,4*n
```

```
EN,J+4+4*n,j,j+4
```

```
*ENDDO
```

```
!!!!!! LIGAR PONTOS DIAGONAIS LATERAIS !!!!!!!!
```

```
REAL,3
```

```

*DO,W,1,T-1
      *DO,B,1,k

!!!!!!!à Direita dos apoios!!!!!!!!!!
      EN,B+4+8*n+(W-1)*K,4+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4,5+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4
      EN,B+4+8*n+(W-1)*K,(T-1)*K,3+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4,6+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4
!!!!!!! à Esquerda dos apoios !!!!!!!
      EN,B+4+8*n+(W-1)*K+2*(T-1)*K,1+4*K+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4,8+4*K+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4
      EN,B+4+8*n+(W-1)*K+3*(T-1)*K,2+4*K+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4,7+4*K+(B-1)*4+(W-1)*2*k*4
!!NOTA: 3*(T-1), quer dizer k estamos a repetir o processo 4 vezes, isto pk a !!!inicial não !conta, logo !!!aparece 3!!
      *ENDDO

*ENDDO
!!!!!!! LIGAR PONTOS DIAGONAIS SUP E INF !!!!!!!!!!!
REAL,4
*DO,S,1,n
      EN,S+4+10*n,3+(S-1)*4,8+(S-1)*4
      EN,S+4+11*n,1+(S-1)*4,6+(S-1)*4

*ENDDO
EPLOT
/PNUM,NODE,1      !Mostra números dos nós
/PNUM,ELEM,1      !Mostra numeros dos elementos
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!! Constrangimentos !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

D,1,UX,0
D,1,UY,0
D,1,UZ,0
D,2,UX,0
D,4,UX,0

*DO,U,1,T-1      !4 É O NUMERO DE APOIOS!!!
D,1+(U)*8*K,UY,0
D,2+(U)*8*K,UY,0
D,1+(U)*8*K,UX,0
D,4+(U)*8*K,UX,0
*ENDDO

*DO,U,T-1,T-1
D,3+(U)*8*K,UX,0
*ENDDO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! CARREGAMENTOS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
F_chapas_lat=42*dist*altura/2
F_chapas_sup_inf=42*dist*largura_inf/2
F_chapas=F_chapas_lat+F_chapas_sup_inf

C_a=2 ! coeficiente de arrasto do "paralelipedo" -> 2
*DO,I,1,n+1
      F,1+(I-1)*4,FY,-FA-F_chapas
      F,2+(I-1)*4,FY,-FB-F_chapas
      F,3+(I-1)*4,FY,-FD-F_chapas
      F,4+(I-1)*4,FY,-FC-F_chapas
      F,2+(I-1)*4,FX,-C_a*FV
      F,3+(I-1)*4,FX,-C_a*FV
*ENDDO

F,5+(K-1)*4+2*k*4,FY,-3*(Fo/2)-FA-F_chapas
F,6+(K-1)*4+2*k*4,FY,-3*(Fo/2)-FB-F_chapas

!Aplicação da aceleração da gravidade
ACEL,,9.81 !Loads - Define Loads - Apply - Structural - Inertia - Gravity - ACELY=9.81

FINISH

! SOLUCAO DO PROBLEMA DE E.F.
/SOLU

```

```

/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

/POST1
! DEFINICAO DE TVOL
ETABLE,VOLUME,VOLU,
SSUM
*GET,TVOL,SSUM,,ITEM,VOLUME

! DEFINICAO DAS TENSÕES NAS BARRAS
ETABLE,XSIGMA,LS,1      !Preenche tabela com tensões nas barras
*DIM,SX,ARRAY,16+(n-1)*12,1
*DO,i,1,16+(n-1)*12
*GET,SX(i),ETAB,2,ELEM,i
*ENDDO

*DIM,DESLX,ARRAY,n*8-((n-1)*4),1
*DO,i,1,n*8-((n-1)*4)
*GET,DESLX(i),NODE,i,U,X
*ENDDO

*DIM,DESLY,ARRAY,n*8-((n-1)*4),1
*DO,i,1,n*8-((n-1)*4)
*GET,DESLY(i),NODE,i,U,Y
*ENDDO
*DIM,VOL,ARRAY,16+(n-1)*12,1
*DO,i,1,16+(n-1)*12
*GET,VOL(i),ETAB,1,ELEM,i
*ENDDO
!
! Escreve os resultados no ficheiro resultados.txt
*CFOPEN,resultados.txt,,
*VWRITE,'Volume'
(A15)
*VWRITE,TVOL
(E18.6)
*VWRITE,'Tensões'
(A15)
*VWRITE,SX(1)
(E18.6)
*VWRITE,'Desloc_X'
(A20)
*VWRITE,DESLX(1)
(E18.6)
*VWRITE,'Desloc_Y'
(A20)
*VWRITE,DESLY(1)
(E18.6)
*VWRITE,'VOLUME'
(A20)
*VWRITE,VOL(1)
(E18.6)
*CFCLOSE
FINISH

```


ANEXO V – Programação em Matlab para a estrutura treliçada.

```
% Tese de Mestrado em Engenharia Mecanica
% Vasco André Sobral
%
%Optimização de uma estrutura aerea do tipo galeria, treliçada
%
function [y]=ansys(x)

%DADOS
p=4; %n de perfis
dist_total=100; % distancia total da estrutura
%DADOS PARA O MATLAB E ANSYS

T(1,1)=4;
K(1,1)=7;
n(1,1)=2*(T-1)*K;
dist(1,1)=dist_total/n;
largura_estacoes(1,1)= 0.890 ;% 0.890; % 1.940 ;
largura_inf(1,1)=0.8 +largura_estacoes;
altura(1,1)= 2.5 ;

Q_ad= 310;
Q_c= 100;
Q_g= 280;

if largura_estacoes(1,1)== 0.890
    Q_t= 630;
elseif largura_estacoes(1,1)== 1.940
    Q_t= 2661;
end

Q_op= 1000; %N
Q_v= 1600; % N/m^2
Q_chapas=42 ;% N/m^2

Fad=Q_ad*dist;
Fc=Q_c*dist;
Fg=Q_g*dist;
Ft=Q_t*dist;
Fop=Q_op;
Fv=Q_v*(altura/2)*dist; %acção do vento

FB(1,1)=(Fg*0.4+Ft*(0.8+largura_estacoes/2))/(0.8+largura_estacoes) ;
FA(1,1)=Fc+Fg+Ft-FB;
FC(1,1)=Fad/2;
FD(1,1)=FC(1,1);
FV(1,1)=Fv;
Fo(1,1)=Fop;

caminhoMATLAB='C:\TESE';
nome='\dados_2.txt';
ficheiro_l=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro_l,'w');

fprintf(fid,T=%d\n K=%d\n n=%d\n dist=%d\n largura_estacoes=%d\n largura_inf=%d\n altura=%d\n FA=%d\n FB=%d\n FC=%d\n FD=%d\n FV=%d\n Fo=%d\n
Q_chapas=%d\n,T(1,1),K(1,1),n(1,1),dist(1,1),largura_estacoes(1,1),largura_inf(1,1),altura(1,1),FA(1,1),FB(1,1),FC(1,1),FD(1,1),FV(1,1),Fo(1,1),Q_chapas(1,1));
fclose(fid);

caminhoMATLAB='C:\TESE';
%
if exist('optimo.txt','file')== 2
    nome='optimo.txt';
    ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
    fid= fopen(ficheiro,'r');
    lixo= fscanf(fid,'%s',2);
    vol_opt= fscanf(fid,'%g',1);
    fclose(fid);
    disp('exists');
else
    vol_opt=1e9;
    disp('does not exist');
end
disp('vol_opt');disp(vol_opt);
% escreve o ficheiro de dados para o ANSYS
% !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!TABELA_1!!!!!!!!!!!!!!
%% % % % % % % % % % % % % % % % Perfil quadrado % % % % % % % % % % % % % % %
R_mat_1=1.013 *1.23; % relacao de custo de tubo quadrado com a area de seccao (cm^2)
%esp=4
Tabela_1=[
25, 0, 4, 3.188e-4; % 2.5;
30, 0, 4, 3.988e-4; % 3.13;
35, 0, 4, 4.788e-4; % 3.76;
40, 0, 4, 5.588e-4; % 4.39;
45, 0, 4, 6.388e-4; % 5.01;
50, 0, 4, 7.188e-4; % 5.64;
60, 0, 4, 8.788e-4; % 6.9;
70, 0, 4, 10.39e-4; % 8.15;
80, 0, 4, 11.99e-4; % 9.41;
90, 0, 4, 13.59e-4; % 10.7;
100, 0, 4, 15.19e-4; % 11.9;
120, 0, 4, 18.39e-4; % 14.4;
140, 0, 4, 21.59e-4; % 16.9;
150, 0, 4, 23.19e-4; % 18.2;
150, 0, 4, 23.19e-4; % 18.2;
150, 0, 4, 23.19e-4]; % 18.2];

% % % tabela com e=6
```

106


```

% 180, 0, 6, 41.37e-4];

% % esp=8
% Tabela_4=[
% 50, 0, 8, 12.75e-4;
% 60, 0, 8, 15.95e-4;
% 70, 0, 8, 19.15e-4;
% 80, 0, 8, 22.35e-4;
% 90, 0, 8, 25.55e-4;
% 100, 0, 8, 28.75e-4;
% 120, 0, 8, 35.15e-4;
% 140, 0, 8, 41.55e-4;
% 150, 0, 8, 44.75e-4;
% 160, 0, 8, 47.96e-4;
% 180, 0, 8, 54.35e-4;
% 200, 0, 8, 60.75e-4;
% 220, 0, 8, 67.15e-4;
% 250, 0, 8, 76.75e-4;
% 250, 0, 8, 76.75e-4;
% 250, 0, 8, 76.75e-4];

%display(ficheiro);
ii=zeros(p,1);

for i=1:p
indice=1+x((i-1)*4+1)*8+x((i-1)*4+2)*4+x((i-1)*4+3)*2+x((i-1)*4+4);
ii(i)=indice;
if i==1
nome='\seccoes_1.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'R,%d,%e\n',i,Tabela_1(indice,4));
fclose(fid);
dim_x_1=Tabela_1(indice,1);
dim_y_1=Tabela_1(indice,2);
dim_esp_1=Tabela_1(indice,3);
custo_mat_1=Tabela_1(indice,4)* R_mat_1 *1e4; % as areas estao em m^2 e quero em cm^2
end
if i==2
nome='\seccoes_2.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'R,%d,%e\n',i,Tabela_2(indice,4));
fclose(fid);
dim_x_2=Tabela_2(indice,1);
dim_y_2=Tabela_2(indice,2);
dim_esp_2=Tabela_2(indice,3);
custo_mat_2=Tabela_2(indice,4)* R_mat_2*1e4; % as areas estao em m^2 e quero em cm^2
end
if i==3
nome='\seccoes_3.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'R,%d,%e\n',i,Tabela_3(indice,4));
fclose(fid);
dim_x_3=Tabela_3(indice,1);
dim_y_3=Tabela_3(indice,2);
dim_esp_3=Tabela_3(indice,3);
custo_mat_3=Tabela_3(indice,4)* R_mat_3*1e4; % as areas estao em m^2 e quero em cm^2
end
if i==4
nome='\seccoes_4.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'R,%d,%e\n',i,Tabela_4(indice,4));
fclose(fid);
dim_x_4=Tabela_4(indice,1);
dim_y_4=Tabela_4(indice,2);
dim_esp_4=Tabela_4(indice,3);
custo_mat_4=Tabela_4(indice,4)* R_mat_4*1e4; % as areas estao em m^2 e quero em cm^2
end
end

% Executa o programa ANSYS
system('C:\Program Files\ANSYS Inc\v130\ansys\bin\intel\ANSYS130.exe" -b -i estrutura_trelicada_modelo.txt -o estrutura_trelicada_modelo.out')

% Le o ficheiro de resultados
nome='\resultados.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
%display(ficheiro);
fid= fopen(ficheiro,'r');
lixo= fscanf(fid,'%s',1);
volume= fscanf(fid,'%f',1);
lixo= fscanf(fid,'%s',1);
for i=1:16+(n-1)*12 % para K=1 --- 76, para K=2 --- 148, para k=3 ---- 220
tensao(i,1)= fscanf(fid,'%f',1);
end
lixo=fscanf(fid,'%s',1);
for i=1:n*8-((n-1)*4)
desloc_X(i,1)=fscanf(fid,'%f',1);
end
lixo=fscanf(fid,'%s',1);
for i=1:n*8-((n-1)*4)
desloc_Y(i,1)=fscanf(fid,'%f',1);
end
lixo=fscanf(fid,'%s',1);
for i=1:16+(n-1)*12
Volume(i,1)=fscanf(fid,'%f',1);
end

```

```

fclose(fid);

% Calcula a função de mérito a partir do volume e dos constrangimentos
t_max=max(abs(tensao));
disp('tensao');disp(tensao);
disp('t_max');disp(t_max);

dx_max=max(abs(desloc_X));
dy_max=max(abs(desloc_Y));

tced= 355e6; %tensão de cedencia
fs=2; % factor de segurança
tadm=tced/fs;

if t_max <= tadm
g= 0;
else
g= t_max/tadm;
end
% Funcao objectivo penalizada
% Esta constante tem de ser 'afinada' para o problema
Constante= 80;
y= volume + Constante * g ;
%
if t_max <= tadm
if dx_max <= (1/250)*(dist_total/(T-1)) %%%
if dy_max <= (1/250)*(dist_total/(T-1)) %%%

fprintf('****obj= %f, v= %f, \n Tensões:',y,volume);
for i=1:16+(n-1)*12
fprintf('%E\n',tensao(i,1));
end
fprintf('Perfis:\n')
% for i=1:p
fprintf('%2d\n', ii);
% end
fprintf('Custo:\n');
fprintf('%8d\n',Custo);

nome='optimo_log.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'a');
fprintf(fid,'Volume Optimo:\n %2d\nTensões:\n',y,volume);
for i=1:16+(n-1)*12
fprintf(fid,'%e\n',tensao(i,1));
end
fprintf(fid,'Perfis:\n');
% for i=1:p
fprintf(fid,'%2d\n', ii);
% end
fprintf(fid,'Custo:\n');
fprintf(fid,'%8d\n',Custo);
fclose(fid);
if volume < vol_opt
nome='optimo.txt';
ficheiro=[caminhoMATLAB,nome];
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'Volume Optimo:\n %2d\nTensões:\n',y,volume);
for i=1:16+(n-1)*12
fprintf(fid,'%e\n',tensao(i,1));
end
fprintf(fid,'Perfis:\n');
fprintf(fid,'%2d\n', ii);

fprintf(fid,'Desloc_X:\n')
for i=1:n*8-((n-1)*4)
fprintf(fid,'%e\n',desloc_X(i,1));
end
fprintf(fid,'Desloc_Y:\n')
for i=1:n*8-((n-1)*4)
fprintf(fid,'%e\n',desloc_Y(i,1));
end
fprintf(fid,'Volume\n')
fprintf(fid,'%2d\n', Volume);
fprintf(fid,'Custo:\n');
fprintf(fid,'%8d\n',Custo);
fclose(fid);
end
end
else
disp('Fora dos constrangimentos');
fprintf('****obj= %f, v= %f, \n Tensões:',y,volume);
for i=1:16+(n-1)*12
fprintf('%E\n',tensao(i,1));
end
fprintf('Perfis:\n')
% for i=1:p
fprintf('%2d\n', ii);
% end
disp('t_max');
disp(t_max);
fprintf('Custo:\n');
fprintf('%8d\n',Custo);
end
end

```



```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!! OPTIMIZACAO DE UMA ESTRUTURA TUBULAR !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!! PARA UMA LARGURA DE TELA E DISTANCIA ENTRE VÃOS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!! VASCO SOBRAL ||||| FCT/UNL !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

111

```

*IF,L,NE,890,THEN ! logo 1940mm
  Q_t= 2662 !N
*ENDIF

F_ad=Q_ad*dist
F_c=Q_c*dist
F_g=Q_g*dist
F_t=Q_t*dist
F_op=Q_op

FB =(F_g*0.4+F_t*(0.8+((L/1000)/2)))/(0.8+(L/1000))
FA =F_c+F_g+F_t-FB
FC =F_ad/2
FD =FC
FV =Q_v

/PNUM,KP,1 !PlotCtrls - Numbering - Keypoint numbers=ON
/PNUM,LINE,1

K,1,0,H,0 !Modeling - Create - Keypoints - In Active CS - X,Y,Z (Apply)
K,2,R,H,0

CIRCLE,1,,,2,,

CSKP,15,1,1,3,4,, ! DEFENIR O NOVO REFERENCIAL PARA CONSTRUIR AS AREAS
CSYS,0
K,7,-R,H-H_1/2,0
K,8,0,H-H_1/2,0
K,9,R,H-H_1/2,0
!!!!!! necessario ter atenção ao 1.25 !!!!!!! altura admitida para a metade superior
! do circulo e a barra de suporte de cabos e sistemas adicionais
K,10,-R,H+1.25,0
K,11,R,H+1.25,0

LSTR,7,8
LSTR,8,9
LSTR,9,3
LSTR,7,5

LSTR,1,5
LSTR,1,3
LSTR,1,6
LSTR,6,8

LSTR,5,10
LSTR,10,11
LSTR,11,3

A,1,5,7,8,1 !Modeling - Create - Areas - By Lines - Pick 1,5,7,8,1
A,1,5,6,8,1
A,1,8,9,3,1
A,1,8,6,3,1

A,3,4,5
A,3,11,10,5

/PNUM,AREA,1
ASBA,1,2,,KEEP,KEEP
ASBA,3,4,,KEEP,KEEP
ASBA,5,6,,KEEP,KEEP

!!! APAGAR AREAS !!!!!!!!

ADELE,ALL !! apaga todas as areas

!!!!!! APAGAR LINHAS

```

LDELE,ALL !! apaga todas as linhas

CSYS,15

! valor em graus -> posição do reforço em relação ao tubo

! valores de teta retirados do solidworks

*IF,L,EQ,890,THEN

teta=62.40

*ENDIF

*IF,L,NE,890,THEN

teta=42.64

*ENDIF

dr=15 !! valor que reflecte a metade da dimensão do reforço

K,16,R,-teta,

K,17,R,-teta+dr,

K,18,R,-teta-dr,

K,19,-R,teta

K,20,-R,teta-dr,

K,21,-R,teta+dr,

K,22,-R,teta-dr/2

K,23,-R,teta+dr/2

K,24,R,-teta-dr/2

K,25,R,-teta+dr/2

!!!CRIAR NOVAS LINHAS

LSTR,12,13 !! criar linha entre ponto 12 e 13

LSTR,14,15

LARC,15,14,4,

LARC,18,21,6,

LARC,12,21,23

LARC,20,12,22

LARC,13,18,24

LARC,17,13,25

LARC,20,15,5

LARC,17,14,3

dZ=0.5 ! valor de metade da largura dos reforços perto dos apoios

LGEN,2, 1, 10, , , ,dZ, , ,

LGEN, N+1, 1,10, , , , dist, , , !!!!gerar secções ao longo de Z

LGEN, N, 11, 20, , , , dist, , ,

LGEN, 2, 1,10, , , , dist-dZ, , ,

LGEN, N, 1+10*(1+N*2),1+10*(1+N*2)+9, , , , dist, , ,

!!!! FAZER AS LIGACOES DA LINHAS !!!!!!!!!!!!!

LSTR,14,28

LSTR,15,29

LSTR,20,32

LSTR,12,26

LSTR,21,31

LSTR,18,30

LSTR,13,27

LSTR,17,33

*DO,I,1,1

LSTR,8*(I-1)+28,8*(I-1)+28+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+29,8*(I-1)+29+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+26,8*(I-1)+26+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+30,8*(I-1)+30+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+31,8*(I-1)+31+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+27,8*(I-1)+27+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+32,8*(I-1)+32+8*(M*12)

LSTR,8*(I-1)+33,8*(I-1)+33+8*(M*12)

*ENDDO

```

*DO,I,I,N-1
LSTR,8*(I-1)+28+8*(M*12),8*I+28
LSTR,8*(I-1)+29+8*(M*12),8*I+29
LSTR,8*(I-1)+30+8*(M*12),8*I+30
LSTR,8*(I-1)+31+8*(M*12),8*I+31
LSTR,8*(I-1)+32+8*(M*12),8*I+32
LSTR,8*(I-1)+33+8*(M*12),8*I+33
LSTR,8*(I-1)+26+8*(M*12),8*I+26
LSTR,8*(I-1)+27+8*(M*12),8*I+27

LSTR,8*I+28,8*(I-1)+28+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+29,8*(I-1)+29+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+30,8*(I-1)+30+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+31,8*(I-1)+31+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+32,8*(I-1)+32+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+33,8*(I-1)+33+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+26,8*(I-1)+26+8*(7+6*(M-1))
LSTR,8*I+27,8*(I-1)+27+8*(7+6*(M-1))

LSTR,8*(I-1)+28+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+28+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+29+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+29+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+26+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+26+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+30+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+30+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+31+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+31+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+27+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+27+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+32+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+32+8*(M*12)
LSTR,8*(I-1)+33+8*(7+6*(M-1)),8*(I)+33+8*(M*12)
*ENDDO

```

```

*DO,I,N,N
LSTR,8*(I-1)+28+8*(M*12),8*I+28
LSTR,8*(I-1)+29+8*(M*12),8*I+29
LSTR,8*(I-1)+26+8*(M*12),8*I+26
LSTR,8*(I-1)+30+8*(M*12),8*I+30
LSTR,8*(I-1)+31+8*(M*12),8*I+31
LSTR,8*(I-1)+27+8*(M*12),8*I+27
LSTR,8*(I-1)+32+8*(M*12),8*I+32
LSTR,8*(I-1)+33+8*(M*12),8*I+33
LSTR,8*(I-1)+26+8*(M*12),8*I+26
LSTR,8*(I-1)+27+8*(M*12),8*I+27
*ENDDO

```

!!!!!!! criar pontos / linhas para criar areas de reforço na zona dos apoios "aneis"!!!!!!!
y=0.15 ! "altura" dos reforços

```

K,3000,R+y,-teta
K,3001,R+y,-teta-dr
K,3002,R+y,-teta-dr/2
K,3003,R+y,-teta+dr
K,3004,R+y,-teta+dr/2
K,3005,-R-Y,teta
K,3006,-R-y,teta-dr
K,3007,-R-y,teta-dr/2
K,3008,-R-y,teta+dr
K,3009,-R-y,teta+dr/2

```

```

LSTR,1,14
*GET,LN_1,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_1,14,y,1
LSTR,1,15
*GET,LN_2,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_2,15,y,1
LSTR,1,4
*GET,LN_3,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_3,4,y,1

```



```

LSTR,1,3
*GET,LN_4,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_4,3,y,1
LSTR,1,5
*GET,LN_5,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_5,5,y,1
LSTR,1,6
*GET,LN_6,LINE,0,NUM,MAXD
LEXTND,LN_6,6,y,1
LDELE,LN_1,LN_6+1,1

LARC,170+144*(M-1),171+144*(M-1),172+144*(M-1)
LARC,3006,171+144*(M-1),174+144*(M-1)
LARC,3003,170+144*(M-1),173+144*(M-1)
LARC,3003,3000,3004
LARC,3000,3001,3002
LARC,3006,3005,3007
LARC,3005,3008,3009
LARC,3008,3001,175+144*(M-1)

LSTR,14,170+144*(M-1)
LSTR,15,171+144*(M-1)
LSTR,20,3006
LSTR,12,3005
*GET,N_apoio_1,LINE,0,NUM,MAXD
LSTR,21,3008
LSTR,18,3001
LSTR,13,3000
*GET,N_apoio_2,LINE,0,NUM,MAXD
LSTR,17,3003

MAT,1
TYPE,1
SECNUM,4

L_n=335+324*(M-1)
AL,3,L_n+8,L_n,L_n+9
AL,9,L_n+9,L_n+1,L_n+10
AL,6,L_n+10,L_n+5,L_n+11
AL,5,L_n+11,L_n+6,L_n+12
AL,4,L_n+12,L_n+7,L_n+13
AL,7,L_n+13,L_n+4,L_n+14
AL,8,L_n+14,L_n+3,L_n+15
AL,10,L_n+15,L_n+2,L_n+8

w=1 ! o maximo de w é 3 para o problema considerado
*IF,w,EQ,1,THEN
c=NA
*ENDIF
*IF,w,NE,1,THEN
c=NA*w-(w-1)
*ENDIF

AGEN,c,1,8,1,,dist*M**2/w
!!!!!!!!!!!!!!!!!! criar pontos para representar os apoios
comp_apoio=0.30 !! comprimento do apoio em relacao a sup ext do cilindro
*IF,L,EQ,890,THEN
b= 65 !!angulo de inclinação dos apoios em reletivamente ao centro do cilindro
*ENDIF
*IF,L,NE,890,THEN
b=47 !!angulo de inclinação dos apoios em reletivamente ao centro do cilindro
*ENDIF

*DO,I,1,T
K,1000+I*2,R+comp_apoio,-b,(I-1)*dist*A
K,1001+I*2,-R-comp_apoio,b,(I-1)*dist*A

```

*ENDDO

!!!! CONSTRANGIMENTOS !!!!!!!

DK,1002,UZ,0

DK,1003,UZ,0

*DO,U,1,T !4 É O NUMERO DE APOIOS!!!

DK,1002+(U-1)*2,UX,0

DK,1002+(U-1)*2,UY,0

DK,1003+(U-1)*2,UX,0

DK,1003+(U-1)*2,UY,0

DK,1002+(U-1)*2,ROTY,0

DK,1003+(U-1)*2,ROTY,0

DK,1002+(U-1)*2,ROTZ,0

DK,1003+(U-1)*2,ROTZ,0

*ENDDO

DK,1002+(T-1)*2,UZ,0

DK,1003+(T-1)*2,UZ,0

LSTR,3000,1002

*GET,N_apoios_i,LINE,0,NUM,MAXD

LSTR,3005,1003

*DO,I,1,T-1 !!!

LSTR,183+16*(I-1)*w+144*(M-1)+(w-1)*16,1003+(I)*2

LSTR,189+16*(I-1)*w+144*(M-1)+(w-1)*16,1002+(I)*2

*ENDDO

*GET,N_apoios_s,LINE,0,NUM,MAXD

!!!!!! APLICAR CARREGAMENTOS NA ESTRUTURA !!!!!!!!!!!!!

FK,12,FY,-FB

FK,13,FY,-FA

FK,14,FY,-FC

FK,15,FY,-FD

*DO,U,2,N+1

FK,12+14+8*(U-1),FY,-FB

FK,13+14+8*(U-1),FY,-FA

FK,14+14+8*(U-1),FY,-FC

FK,15+14+8*(U-1),FY,-FD

*ENDDO

!!!!!!!!!!!!!! Aplicar a carga dos operarios

FK,26+8*M+8*M*(T-2),FY,-(3*F_op/2)-FB

FK,27+8*M+8*M*(T-2),FY,-(3*F_op/2)-FB

KDELE,2,11 ! apaga os keypoints de 2 a 11

NUMMRG,ALL

!!!!!! CRIAR AREAS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!1

MAT,1

TYPE,1

SECNUM,1

*IF, M,NE,1,THEN

LN=191-10+10*(1+(M-1)*18)

*ENDIF

AL,3,LN,13,LN+1

AL,9,LN+1,19,LN+2

SECNUM,2

REAL,2

AL,6,LN+2,16,LN+3

AL,5,LN+3,15,LN+4

SECNUM,1

REAL,1

AL,4,LN+4,14,LN+5
 SECNUM,2
 REAL,2
 AL,7,LN+5,17,LN+6
 AL,8,LN+6,18,LN+7
 SECNUM,1
 REAL,1
 AL,10,LN+7,20,LN

J= 133 ! 3ª fila de linhas concentricas, de valor inferior
 G=120 ! geração de linhas com a implementação de M
 P=60

AL,13,LN+8,J+(M-1)*G,LN+9
 AL,19,LN+14,J+(M-1)*G+6,LN+9
 AL,16,LN+10,J+(M-1)*G+3,LN+14
 AL,15,LN+12,J+(M-1)*G+2,LN+10
 AL,14,LN+11,J+(M-1)*G+1,LN+12
 AL,17,LN+13,J+(M-1)*G+4,LN+11
 AL,18,LN+15,J+(M-1)*G+5,LN+13
 AL,20,LN+15,J+(M-1)*G+7,LN+8

*DO,I,I,N-1
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10,LN+(I-1)*24+16,23+(I-1)*10,LN+(I-1)*24+16+1
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+6,LN+(I-1)*24+16+1,23+(I-1)*10+6,LN+(I-1)*24+16+1+3
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+3,LN+(I-1)*24+16+4,23+(I-1)*10+3,LN+(I-1)*24+16+1+5
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+2,LN+(I-1)*24+16+6,23+(I-1)*10+2,LN+(I-1)*24+16+1+2
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+1,LN+(I-1)*24+16+3,23+(I-1)*10+1,LN+(I-1)*24+16+1+1
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+4,LN+(I-1)*24+16+2,23+(I-1)*10+4,LN+(I-1)*24+16+1+6
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+5,LN+(I-1)*24+16+7,23+(I-1)*10+5,LN+(I-1)*24+16+1+4
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+7,LN+(I-1)*24+16+5,23+(I-1)*10+7,LN+(I-1)*24+16+1-1
 AL,13+I*10,LN+(I-1)*24+16+7+1,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10,LN+(I-1)*24+16+7+2
 AL,13+I*10+6,LN+(I-1)*24+16+7+2,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+6,LN+(I-1)*24+16+7+5
 AL,13+I*10+3,LN+(I-1)*24+16+7+5,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+3,LN+(I-1)*24+16+7+7
 AL,13+I*10+2,LN+(I-1)*24+16+7+7,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+2,LN+(I-1)*24+16+7+4
 AL,13+I*10+1,LN+(I-1)*24+16+7+4,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+1,LN+(I-1)*24+16+7+3
 AL,13+I*10+4,LN+(I-1)*24+16+7+3,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+4,LN+(I-1)*24+16+7+8
 AL,13+I*10+5,LN+(I-1)*24+16+7+8,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+5,LN+(I-1)*24+16+7+6
 AL,13+I*10+7,LN+(I-1)*24+16+7+6,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+7,LN+(I-1)*24+16+7+1

AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10,LN+9+I*24-1,J+(M-1)*G+I*10,LN+9+I*24
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+6,LN+9+I*24-1+1,J+(M-1)*G+I*10+6,LN+9+I*24+5
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+3,LN+9+I*24-1+6,J+(M-1)*G+I*10+3,LN+9+I*24-1+2
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+2,LN+9+I*24-1+4,J+(M-1)*G+I*10+2,LN+9+I*24-1+2
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+1,LN+9+I*24-1+3,J+(M-1)*G+I*10+1,LN+9+I*24-1+4
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+4,LN+9+I*24-1+5,J+(M-1)*G+I*10+4,LN+9+I*24-1+3
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+5,LN+9+I*24-1+7,J+(M-1)*G+I*10+5,LN+9+I*24-1+5
 AL,13+70+P*(M-1)+(I-1)*10+7,LN+9+I*24-1,J+(M-1)*G+I*10+7,LN+9+I*24-1+7

*ENDDO

*DO,I,N,N
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10,LN+(I-1)*24+16,23+(I-1)*10,LN+(I-1)*24+16+1
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+6,LN+(I-1)*24+16+1,23+(I-1)*10+6,LN+(I-1)*24+16+1+5
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+3,LN+(I-1)*24+16+2,23+(I-1)*10+3,LN+(I-1)*24+16+1+5
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+2,LN+(I-1)*24+16+4,23+(I-1)*10+2,LN+(I-1)*24+16+2
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+1,LN+(I-1)*24+16+1+2,23+(I-1)*10+1,LN+(I-1)*24+16+1+3
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+4,LN+(I-1)*24+16+1+4,23+(I-1)*10+4,LN+(I-1)*24+16+1+2
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+5,LN+(I-1)*24+16+1+6,23+(I-1)*10+5,LN+(I-1)*24+16+1+4
 AL,J+(M-1)*G+(I-1)*10+7,LN+(I-1)*24+16+1-1,23+(I-1)*10+7,LN+(I-1)*24+16+1+6
 *ENDDO

```

/VIEW,,1,1,1
/DSCALE,,AUTO
KDELE,1
KDELE,460,463,1
KDELE,22,25,1
KDELE,3002
KDELE,3004
KDELE,3007
KDELE,3009
NUMMRG,KP

```

```

!NAR, n° de areas presentes na estrutura
*GET,NAR,AREA,0,NUM,MAXD

```

```

!!REVER !!!
MSHAPE,0
MSHKEY,1
!SMRTSIZE,3
*DO,I,1,8*c
      SECNUM,4
      AMESH,I
*ENDDO

```

```

!refina os locais onde estão os apoios
! depois do anel
*DO,I,1,NA-1
SECNUM,1
AMESH,8*(c)+1+(48)*(I-1)*M
AMESH,8*(c)+2+(48)*(I-1)*M
SECNUM,2
AMESH,8*(c)+3+(48)*(I-1)*M
AMESH,8*(c)+4+(48)*(I-1)*M
SECNUM,1
AMESH,8*(c)+5+(48)*(I-1)*M
SECNUM,2
AMESH,8*(c)+6+(48)*(I-1)*M
AMESH,8*(c)+7+(48)*(I-1)*M
SECNUM,1
AMESH,8*(c)+8+(48)*(I-1)*M
*ENDDO

```

```

! antes do anel

```

```

*DO,I,1,NA-1
SECNUM,1
AMESH,41+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
AMESH,42+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
SECNUM,2
AMESH,43+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
AMESH,44+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
SECNUM,1
AMESH,45+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
SECNUM,2
AMESH,46+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
AMESH,47+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
SECNUM,1
AMESH,48+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1)
*ENDDO

```

```

! numero de elementos ate este ponto

```

```

*GET,ELEM_1,ELEM,0,NUM,MAX

```

```

      ! refina as areas entre os apoios

```

```

*DO,I,1,NA-1
SECNUM,1
AMESH,8+8*c+1+48*(I-1)*M,40+8*c+48*(I-1)*M+48*(M-1),1
196+48*(I-1)*M+48*(M-1)

```

```

*ENDDO
*GET,ELEM_2,ELEM,0,NUM,MAX

NUMMRG,NODES,2E-2  !!!!! caso exista um nos fora do previsto num raio de ____ este ira juntar-se ao mais proximo

!!!!!!!!!!!!!! selecionar uma zona para aplicar as cargas FV
! seleciona todos os nos
C_a=1.2 ! Coeficiente de arrasto da geometria
Q_v=C_a*1600 ! N/m^2
NSEL,S,LOC,Y,-90,-teta-dr-0.001
NSEL,A,LOC,Y,-teta+dr+0.001,90
NSEL,R,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Z,0,dz ! dz é a espessura do reforco (metade)

*afun,deg  ! Degree units for trig. functions
*GET,NUM_NODES_1,NODE,0,COUNT
A_t_1=2*R*dz
A_r_1=-(R*sin(-teta-dr)-R*sin(-teta+dr))*dz
FV_1=Q_v*(A_t_1-A_r_1)
F,ALL,FX,-FV_1/NUM_NODES_1

NSEL,S,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Y,-teta-dr,-teta+dr
NSEL,R,LOC,Z,0,dz
*GET,NUM_NODES_2,NODE,0,COUNT
FV_2=Q_v*(A_r_1)
F,ALL,FX,-FV_2/NUM_NODES_2

*DO,I,1, N
NSEL,S,LOC,Y,-90,-teta-dr-0.001
NSEL,A,LOC,Y,-teta+dr+0.001,90
NSEL,R,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Z,dz+0.001+dist*(I-1),dist*I-dz ! dz é a espessura do reforco (metade)
*GET,NUM_NODES_3,NODE,0,COUNT
A_t_2=2*R*(dist - 2* dz)
A_r_2=-(R*sin(-teta-dr)-R*sin(-teta+dr))*dist
FV_3=Q_v*(A_t_2-A_r_2)
F,ALL,FX,-FV_3/NUM_NODES_3

NSEL,S,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Y,-teta-dr,-teta+dr
NSEL,R,LOC,Z,dz+0.001+dist*(I-1),dist*I-dz
*GET,NUM_NODES_4,NODE,0,COUNT
FV_4=Q_v*(A_r_2)
F,ALL,FX,-FV_4/NUM_NODES_4

*ENDDO

*DO,I,1, N-1
NSEL,S,LOC,Y,-90,-teta-dr-0.001
NSEL,A,LOC,Y,-teta+dr+0.001,90
NSEL,R,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Z,0+dist*(I)-dz+0.001,dist*(I)+dz ! dz é a espessura do reforco (metade)
*GET,NUM_NODES_5,NODE,0,COUNT
A_t_3=2*R*2*dz
A_r_3=-(R*sin(-teta-dr)-R*sin(-teta+dr))*2*dz
FV_5=Q_v*(A_t_3-A_r_3)
F,ALL,FX,-FV_5/NUM_NODES_5

NSEL,S,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Y,-teta-dr,-teta+dr
NSEL,R,LOC,Z,0+dist*(I)-dz+0.001,dist*(I)+dz
*GET,NUM_NODES_6,NODE,0,COUNT
FV_6=Q_v*(A_r_3)
F,ALL,FX,-FV_6/NUM_NODES_6
*ENDDO

```

```

*DO,I,N,N
NSEL,S,LOC,Y,-90,-teta-dr-0.001
NSEL,A,LOC,Y,-teta+dr+0.001,90
NSEL,R,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Z,0+dist*(I)-dz+0.001,dist*(I) ! dz é a espessura do reforço (metade)

*GET,NUM_NODES_7,NODE,0,COUNT
A_t_4=2*R*dz
A_r_4=-(R*sin(-teta-dr)-R*sin(-teta+dr))*dz
FV_7=Q_v*(A_t_4-A_r_4)
F,ALL,FX,-FV_7/NUM_NODES_7

NSEL,S,LOC,X,R
NSEL,R,LOC,Y,-teta-dr,-teta+dr
NSEL,R,LOC,Z,0+dist*(I)-dz+0.001,dist*(I)
*GET,NUM_NODES_8,NODE,0,COUNT
FV_8=Q_v*(A_r_4)
F,ALL,FX,-FV_8/NUM_NODES_8
*ENDDO

NSEL,ALL ! pk apenas os nos e k estavam constrangidos a seleccao

!!!!!!!!!!!!!!
!REAL,3
TYPE,3
SECNUM,3
LMESH,N_apoio_1
LMESH,N_apoio_2
!!!!!! CORRIGIR!!!!!!
LMESH,393+324*(M-1),393+324*(M-1)+96,48
LMESH,383+324*(M-1),383+324*(M-1)+96,48
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! corrige fim
LMESH,N_apoios_I,N_apoios_S,1
!!!!!!!!!!
SECNUM,5
LMESH,1
*DO,I,1,N

LMESH,1+10*(I+1)
*ENDDO

!Transferência para os elementos das condições de fronteira aplicadas na geometria
SBCTRAN !Loads - Define Loads - Operate - Transfer to FE - All Solid Lds
NUMMRG,ALL
NUMCMP,NODE
NUMMRG,ELEM

!Aplicação da aceleração da gravidade
ACEL,,9.81 !Loads - Define Loads - Apply - Structural - Inertia - Gravity - ACELY=9.81

*GET,ELEM_MAX,ELEM,0,NUM,MAXD
FINISH
!
! SOLUCAO DO PROBLEMA DE E.F.
/SOLU
!NLGEOM,ON
ANTYPE,STATIC
SOLVE
FINISH

/POST1
! DEFINICAO DAS TENSÕES NAS CHAPAS
ETABLE,XSIGMA,SX !Preenche tabela com tensões nas barras
ETABLE,YSIGMA,SY
ETABLE,ZSIGMA,SZ

```

ESEL,S,,ELEM_1+1,ELEM_2

PLNSOL,S,X

*GET,S_max_X,PLNSOL,0,MAX,,

*GET,S_min_X,PLNSOL,0,MIN,,

PLNSOL,S,Y

*GET,S_max_Y,PLNSOL,0,MAX,,

*GET,S_min_Y,PLNSOL,0,MIN,,

PLNSOL,S,Z

*GET,S_max_Z,PLNSOL,0,MAX,,

*GET,S_min_Z,PLNSOL,0,MIN,,

*STAT

FINISH

ANEXO VII – Programação em Matlab para o custo da estrutura treliçada.

[illegible]

125

ANEXO VIII – Programação em Matlab para o custo da estrutura tubular.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Custo estrutura tubular %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Vasco André Sobral
% FCT / UNL

%dist_total = input('dist_total(m)=');
dist_total= 100 ;% distancia admitida para a estrutura (m)
%esp = input('esp(m)=');
esp = 0.005 ; %espessura da chapa principal (m)
%L_estacoes = input('L_estacoes(mm)(890 ou 1940)=');
L_estacoes= 1940; % 890 mm % 1940 mm
% largura das estacoes em mm
%M = input('M(metade do numero de seccoos entre apoios)=');
M= 8 ;
% metade das seccoos entre apoios

R=((0.0001*(L_estacoes*L_estacoes)+0.4782*L_estacoes+2089.9)/2)/1000 ;
%Raio do "tubo" (m)
if L_estacoes== 890
    Area_chapa_1= 2 * 6; % (metros) por ??? de comp
else
    Area_chapa_1= 2 * 9; % ??? metros por ???
end
esp_aneis = 0.020 ; % 20 mm

AREA_CHAPA_ANEIS = 2 * 6; % considera-se a compra de uma chapa completa
N_passos_sold=1; % numero de passos de soldadura por cada perimetro considerado
Largura_aneis = 0.18 ; % em metros
Area_vigas_int = 10.3e-4 ; % perfil IPE 100 (10.3 cm^2)-> m^2
Area_pint_vigas_int = 0.4 ; % tabela CHAGAS m^2/m
dim_x_vigas = 0.055; % 55 mm
dim_y_vigas = 0.100 ; % 100 mm

T=4 ; % numero de apoios da estrutura
A=2*M; % numero de secções entre apoios
N=(T-1)*A; % numero de seccoos a colocar
Comp_vigas_int=( R*cos(45*2*pi/360)*2);% comprimento aproximado das vigas internas
Comp_total_vigas_int=( N+1)* Comp_vigas_int;

C_vigas_int= 0.792; %0,792€/Kg
C_chapa = 0.818;% chapa preta ST37, com largura = 2 ou sup
C_processo_calandragem = 0.5; % 0,5€/Kg com corte
D_aco= 7860; %7860 Kg/m^3
C_pintura = 20; % 20€/m^2

% factores de custos
f_mat= 1;
f_sold=1;
f_caland = 1;
f_corte= 1;
f_prep= 1;
f_pint= 2/3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calandragem %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
n_chapa_calandrada_1 = ceil(dist_total/2)*2; % por 2 metros de largura chapa com duas "luas"

Caland_chapa_1 = esp * n_chapa_calandrada_1 * Area_chapa_1 * D_aco * C_processo_calandragem ;

C_calandragem = f_caland*( Caland_chapa_1) ; % apenas se considera a calandragem deste tipo de chapas
disp('C_calandragem'); disp(C_calandragem);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Custo matrial %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
C_mat_1 = C_chapa * D_aco * esp * Area_chapa_1*n_chapa_calandrada_1 ;

% c_mat_2 = aneis de reforco
C_mat_2 = C_chapa * D_aco * esp_aneis * AREA_CHAPA_ANEIS; % 1 chapa completa????

% C_mat_3= vigas internas
C_mat_3 = C_vigas_int * D_aco * Area_vigas_int * Comp_total_vigas_int;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% C_mat= f_mat*( C_mat_1 + C_mat_2 + C_mat_3);
disp('C_mat'); disp(C_mat);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% custo soldadura %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
f_sold_metod=2.5; % factor de marcha associado ao metodo de soldadura
```

128